

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ OPTICKÝCH A OPTOELEKTRONICKÝCH KOMPONENT

MEASUREMENT OF BASIC PARAMETERS OF OPTICAL AND OPTOELECTRONIC COMPONENTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Beneš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Pavel Beneš

**ID:** 195976

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření základních parametrů optických a optoelektronických komponent

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor optických a optoelektronických komponent, jako jsou děliče výkonu, cirkulátory, laserové diody, fotodetektory, modulátory, apod. Pro jednotlivé komponenty budou definovány základní parametry včetně vysvětlení těchto parametrů. V rámci praktické části projektu bude proveden návrh měření parametrů jednotlivých komponent. Následně bude provedeno měření parametrů několika vybraných komponent (min 3 typy optických a 3 typy optoelektronických komponent) různých výrobců a jejich srovnání s katalogovými hodnotami. Výsledkem práce bude soubor protokolů měření včetně stanovení metodik měření jednotlivých parametrů.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KEISER, Gerd. Optical fiber communications. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Companies, c2011. ISBN 0073380717.

[2] FILKA, Miloslav, 2017. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-80-86785-29-5.

**Termín zadání:** 1.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje optickým a optoelektronickým komponentům. V první části práce jsou popsány optické trasy a způsob jejich měření. Ve druhé části jsou popsány dělič výkonu, cirkulátor a izolátor. Dále je zde popsána laserová dioda, fotodetektor a modulátor. Třetí část práce popisuje postup měření dělič výkonu, cirkulátoru, izolátoru, laserové diody, fotodetektoru a modulátoru. Naměřené hodnoty jsou porovnávány s katalogovými hodnotami.

## KLÍČOVÁ SLOVA

cirkulátor, dělič výkonu, fotodetektor, izolátor, laserová dioda, modulátor, spektrum, spektrální šířka, vložný útlum

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with optical and optoelectronic components. The first part of the work describes the optical paths and methods of their measurement. The second part describes the coupler, circulator and isolator. Further described is a laser diode, a photodetector and a modulator. The third part describes the measurement procedure of the coupler, circulator, isolator, laser diode, photodetector and modulator. The measured values are compared with the catalog values.

## KEYWORDS

circulator, coupler, photodetector, isolator, laser diode, modulator, spectrum, spectral linewidth, insert loss

BENEŠ, Pavel. *Měření základních parametrů optických a optoelektronických komponent*. Brno, 2021, 101 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření základních parametrů optických a optoelektronických komponent“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Optické sítě</b>	<b>15</b>
1.1 Optické kabely . . . . .	15
1.2 Měření optických tras . . . . .	18
<b>2 Optické a optoelektronické komponenty</b>	<b>20</b>
2.1 Optické komponenty . . . . .	20
2.1.1 Dělič výkonu . . . . .	20
2.1.2 Izolátor . . . . .	22
2.1.3 Cirkulátor . . . . .	26
2.2 optoelektronické komponenty . . . . .	28
2.2.1 Laserová dioda . . . . .	28
2.2.2 Fotodetektor . . . . .	36
2.2.3 Modulátor . . . . .	40
<b>3 Měření optických a optoelektronických komponent</b>	<b>43</b>
3.1 Měření optických komponent . . . . .	43
3.1.1 Dělič výkonu . . . . .	45
3.1.2 Cirkulátor . . . . .	64
3.1.3 Izolátor . . . . .	70
3.2 Měření optoelektronických komponent . . . . .	72
3.2.1 Laserová dioda . . . . .	72
3.2.2 Fotodetektor . . . . .	77
3.2.3 Modulátor . . . . .	78
<b>Závěr</b>	<b>81</b>
<b>Literatura</b>	<b>83</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>87</b>
<b>A Naměřené hodnoty u děličů výkonu</b>	<b>89</b>

# Seznam obrázků

1.1	Základní schéma optické trasy . . . . .	15
1.2	Profil navázání paprsku do jednovidového vlákna a šíření paprsků ve vlákne . . . . .	16
1.3	Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna se skokovým indexem lomu a šíření paprsků ve vlákne . . . . .	16
1.4	Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna s postupným indexem lomu a šíření paprsků ve vlákne . . . . .	17
1.5	Navázání paprsku do optického vlákna . . . . .	17
1.6	Měření útlumu pomocí metody dvou délek . . . . .	18
1.7	Měření útlumu pomocí metody vložných ztrát . . . . .	19
1.8	Měření útlumu pomocí metody zpětného rozptylu . . . . .	19
2.1	Schéma optického děliče výkonu . . . . .	21
2.2	Znázornění stáčení polarizovaného paprsku pomocí Faradayova efektu . . . . .	23
2.3	Izolátor nezávislý na polarizaci . . . . .	24
2.4	Izolátor závislý na polarizaci . . . . .	25
2.5	Princip čtyřportového cirkulátoru . . . . .	27
2.6	Spontánní emise . . . . .	29
2.7	Stimulovaná emise . . . . .	30
2.8	Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu . . . . .	31
2.9	Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu . . . . .	31
2.10	Homostруктурální laser . . . . .	33
2.11	Heterostруктурální laser s jednoduchou heterostруктурou . . . . .	33
2.12	Heterostруктурální laser s dvojitou heterostруктурou . . . . .	34
2.13	Fabry – Perot laser . . . . .	34
2.14	Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou . . . . .	35
2.15	Hranově vyzařující laser a navázání paprsku do optického vlákna pomocí čočky . . . . .	35
2.16	Plošně vyzařující laser a navázání paprsku do optického vlákna . . . . .	36
2.17	Volt–Ampérová charakteristika fotodiody . . . . .	36
2.18	Znázornění citlivosti fotodiody v závislosti na materiálu a vlnové délce dopadajícího záření . . . . .	38
2.19	Schéma PN fotodiody . . . . .	39
2.20	Schéma PIN diody . . . . .	39
2.21	Schéma lavinové fotodiody . . . . .	40
2.22	Základní princip modulátoru . . . . .	40
2.23	Základní princip modulátoru . . . . .	41
2.24	Modulátor intenzity . . . . .	42



3.1	kalibrace vysílacího laseru FOLS-101 a měřiče výkonu FOPM-102 . . .	44
3.2	Schéma zapojení děličů výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 . . . . .	45
3.3	Schéma zapojení děličů výkonu se SN: A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 . . .	53
3.4	Schéma zapojení děliče výkonu se SN: 17012588 . . . . .	62
3.5	Schéma zapojení cirkulátorů se SN: A16000037, A16001129, 90004659 a 18040064 . . . . .	64
3.6	Schéma zapojení cirkulátoru se SN: 120900180 . . . . .	69
3.7	Schéma zapojení izolátoru se SN: 16004052 . . . . .	71
3.8	Spektrální charakteristika DFB LD100 . . . . .	72
3.9	Spektrální charakteristika FP FOLS-101 . . . . .	73
3.10	Zapojení self-homodyne metody pomocí krátkého zpoždění . . . . .	74
3.11	Zapojení self-homodyne metody pomocí dlouhého zpoždění . . . . .	74
3.12	Reálné zapojení self-homodyne metody pomocí dlouhého vlákna . . . .	75
3.13	Spektrální šířka LD100 pro 14 mA, 20 mA a 30 mA . . . . .	76
3.14	Frekvenční charakteristika PD100 a PT-5330 . . . . .	77
3.15	Znázornění zapojení modulátoru . . . . .	78
3.16	Porovnání vstupního signálu do modulátoru a výstupního signálu z fo- todetektoru . . . . .	79
3.17	Porovnání náběžných hran vstupního signálu do modulátoru a vý- stupního signálu z fotodetektoru . . . . .	80

# Seznam tabulek

3.1	Katalogové hodnoty měřených děličů výkonu . . . . .	45
3.2	Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty . . . . .	46
3.3	Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 při vlnové délce 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty . . . . .	46
3.4	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm . . . . .	47
3.5	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm . . . . .	47
3.6	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,72 dBm . . . . .	48
3.7	Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm . . . . .	49
3.8	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm . . . . .	49
3.9	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm . . . . .	50
3.10	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,00 dBm . . . . .	50
3.11	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,77 dBm . . . . .	51
3.12	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm . . . . .	51
3.13	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm . . . . .	52
3.14	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm . . . . .	52
3.15	Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty	53
3.16	Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 při vlnové délce 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty	54
3.17	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,74 dBm . . . . .	55

3.18	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,87 dBm . . . . .	55
3.19	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,80 dBm . . . . .	56
3.20	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm . . . . .	56
3.21	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm . . . . .	57
3.22	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,93 dBm . . . . .	57
3.23	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,79 dBm . . . . .	58
3.24	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,2 dBm . . . . .	58
3.25	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm . . . . .	59
3.26	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,01 dBm . . . . .	59
3.27	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm . . . . .	60
3.28	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm . . . . .	60
3.29	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,85 dBm . . . . .	61
3.30	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm . . . . .	61
3.31	Vložný útlum pro dělič výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1310 nm i 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty . .	62
3.32	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm . . . . .	63
3.33	Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm . . . . .	63
3.34	Katalogové hodnoty měřených cirkulátorů . . . . .	64
3.35	Cirkulátor se SN: A16000037 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,97 dBm . . . . .	65
3.36	Cirkulátor se SN: A16000037 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm . . . . .	65
3.37	Cirkulátor se SN: A16001129 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm . . . . .	66

3.38 Cirkulátor se SN: A16001129 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm . . . . .	66
3.39 Cirkulátor se SN: 90004659 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm . . . . .	67
3.40 Cirkulátor se SN: 90004659 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm . . . . .	67
3.41 Cirkulátor se SN: 18040064 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 7,16 dBm . . . . .	68
3.42 Cirkulátor se SN: 18040064 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm . . . . .	68
3.43 Cirkulátor se SN: 120900180 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,94 dBm . . . . .	69
3.44 Cirkulátor se SN: 120900180 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm . . . . .	70
3.45 Katalogové hodnoty měřeného izolátoru . . . . .	70
3.46 Izolátor se SN: 16004052 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,81 dBm . . . . .	71
3.47 Izolátor se SN: 16004052 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm . . . . .	71
A.1 Dělič výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm . . . . .	89
A.2 Dělič výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm . . . . .	89
A.3 Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,72 dBm . . . . .	90
A.4 Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm . . . . .	90
A.5 Dělič výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm . . . . .	91
A.6 Dělič výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,00 dBm . . . . .	91
A.7 Dělič výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,77 dBm . . . . .	92
A.8 Dělič výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm . . . . .	92
A.9 Dělič výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm . . . . .	93
A.10 Dělič výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm . . . . .	93

A.11 Dělič výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,74 dBm . . . . .	94
A.12 Dělič výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,87 dBm . . . . .	94
A.13 Dělič výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,80 dBm . . . . .	95
A.14 Dělič výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm . . . . .	95
A.15 Dělič výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm . . . . .	96
A.16 Dělič výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,93 dBm . . . . .	96
A.17 Dělič výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,79 dBm . . . . .	97
A.18 Dělič výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,2 dBm . . . . .	97
A.19 Dělič výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm . . . . .	98
A.20 Dělič výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,01 dBm . . . . .	98
A.21 Dělič výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm . . . . .	99
A.22 Dělič výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm . . . . .	99
A.23 Dělič výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,85 dBm . . . . .	100
A.24 Dělič výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm . . . . .	100
A.25 Dělič výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm . . . . .	101
A.26 Dělič výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm . . . . .	101

# Úvod

Přenosové trasy za pomoci optických vláken jsou v dnešní době velice diskutovanou technologií a v budoucnosti budou ještě více kvůli širokým možnostem nasazení. Využití mají především v přenosu dat na velké vzdálenosti v páteřních sítích. V současnosti se dostávají optická vlákna čím dál více do popředí i v připojení na krátké vzdálenosti. Může se jednat o vlákna, která jsou zakončena na hranici budovy nebo třeba i o vlákna zakončená přímo v obytné části budovy. Hlavní výhodou nasazování komunikace za pomoci optického vlákna je, že ke komunikaci se využívá optický paprsek, který se šíří optickým vláknem, které může být ze skla nebo plastu. Komunikace není tedy náchylná na elektrické rušení. S tím souvisí potřeba velkého množství optických a optoelektronických komponent, které slouží k vytvoření optického signálu a práce s ním.

Cílem této práce je seznámení se základními optickými a optoelektronickými komponentami, jako jsou děliče výkonu, izolátory, cirkulátory, laserové diody, fotodetektory a modulátory. Dále definice jejich základních parametrů včetně vysvětlení těchto parametrů. Následuje výběr děličů výkonu, cirkulátorů, izolátoru, laserové diody, optického modulátoru a fotodetektoru od různých výrobců, provedení návrhu měření a následné experimentální měření a porovnání s katalogovými hodnotami výrobců.

Hlavním přínosem této práce je popis základních optických a optoelektronických komponent, měření parametrů děličů výkonu, cirkulátorů, izolátoru, laserové diody, optického modulátoru a fotodetektoru od různých výrobců a porovnání s katalogovými hodnotami výrobců.

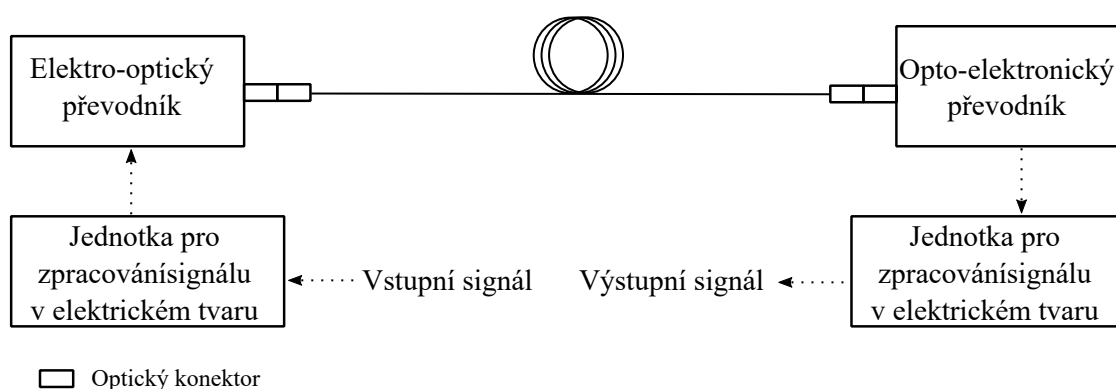
Tato práce je rozdělena do tří kapitol. Kapitola 1 se zaměřuje na problematiku optických tras, které jsou rozděleny na optické kabely a měřící metody. V části o optických kabelových trasách jsou rozepsána jednovidová a mnohavidová vlákna, a také je zde popsán postup navázání paprsku do vlákna. Měřící metody jsou rozděleny na metodu dvou délek, vložných ztrát a zpětného rozptylu. Kapitola 2 se zabývá optickými a optoelektronickými komponentami. Kapitola je rozdělena na dvě části. První část se zaměřuje na komponenty dělič výkonu, izolátor a cirkulátor a jsou zde uvedeny jejich druhy a sledované parametry. Druhá část kapitoly se zabývá popisem laserové diody, fotodetektoru a modulátoru a jsou zde uvedeny jejich druhy a sledované parametry.

V kapitole 3 je zprovozněno testovací prostředí vybraných optických a optoelektronických komponent. U děliče výkonu je změřen dělicí poměr, vložný útlum a izolační schopnosti. U cirkulátoru je změřen vložný útlum, přeslech a izolační schopnosti a u izolátoru je změřen vložný útlum a izolační schopnosti. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulek a porovnány s katalogovými hodnotami. U laserových diod je

změřena spektrální charakteristika záření, spektrální šířka pásma a mezní hodnota proudu. U fotodetektorů je změřena frekvenční charakteristika a u modulátoru jsou ověřeny jeho modulační schopnosti a zkosení hran u modulovaného signálu. Naměřené hodnoty jsou porovnány s katalogovými hodnotami.

# 1 Optické sítě

V dnešní době jsou optické sítě jako jedny z nejnásazovanějších komunikačních prostředků v telekomunikacích. Optický přenosový systém se skládá ze zdroje optického záření, kde jeho úkolem je převod elektrického signálu na signál optický. Optického detektoru, který má za úkol převod optického signálu zpět na signál elektrický. Dále z optické trasy, která má za úkol přenos optického signálu bez nutnosti přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem, jak je znázorněno na obr. 1.1. Dále optický systém obsahuje spoje, buď pevné, jako jsou optické sváry nebo rozpojitelné pomocí optických konektorů. Dále trasa může obsahovat různé optické a optoelektronické komponenty, které mohou významně ovlivňovat průchod optického signálu [1].



Obr. 1.1: Základní schéma optické trasy [1].

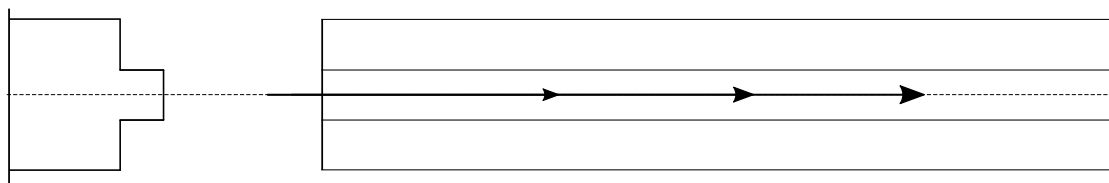
## 1.1 Optické kabely

Pro přenos dat v optickém vlákně je využíván odraz světelného paprsku. V optické soustavě se využívá rozsah infračerveného záření v rozmezí 800 – 1600 nm. Jako zdroj světla se využívají laserové a LED (Light emitting diode) diody. Vláknem se skládá z jádra, pláště, vnitřní a sekundární ochrany. Jádro je vyrobeno ze skla nebo plastu. Plášť je tenká vrstva skla nebo plastu a obklopuje jádro. Jelikož má jiný index lomu, tak dochází k vnitřnímu odrazu šířeného paprsku. Primární ochrana slouží ke krytí před vlhkostí a zvyšuje pevnost vlákna. Sekundární ochrana slouží k ochraně před poškozením a mechanickým namáháním [2].

Základní dělení optických vláken je na jednojádřová vlákna, kde průměr jádra je 9  $\mu\text{m}$  a průměr pláště 125  $\mu\text{m}$ , využívá vlnové délky 850 nm a 1300 nm a mnohójádřová vlákna, kde průměr jádra je 50 nebo 62,5  $\mu\text{m}$  a průměr pláště 125  $\mu\text{m}$ , využívá vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Jednojádřová vlákna využívají pro přenos informací jeden paprsek ve vlákně. Výhodnou jednojádřových vláken je nízký útlum



signálu, využívá se především na delších trasách [2]. Profil navázání paprsku do jednovidového vlákna a šíření paprsků je znázorněno na obr. 1.2. Mnohavidová vlákna



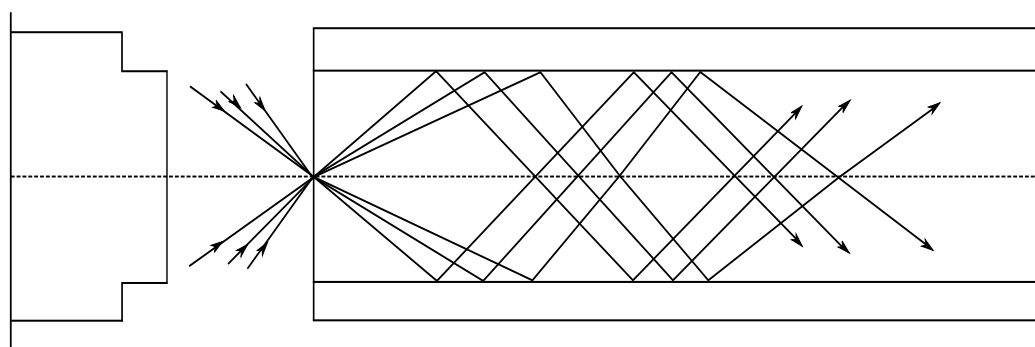
Profil indexu lomu

Pohyb paprsku ve vlákně

Obr. 1.2: Profil navázání paprsku do jednovidového vlákna a šíření paprsků ve vlákně [3].

využívají více světelných paprsků. Dělí se na:

**Se skokovou změnou indexu lomu** se využívají na krátké vzdálenosti. Světelné paprsky se do vlákna navazují pod různými úhly a pro svůj pohyb ve vlákně využívají totálního odrazu. Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna se skokovou změnou indexu lomu a šíření paprsků je znázorněn na obr. 1.3.



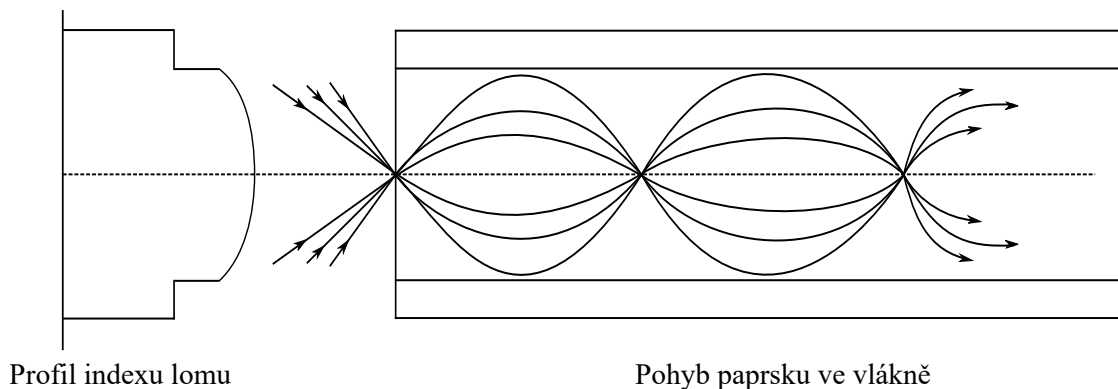
Profil indexu lomu

Pohyb paprsku ve vlákně

Obr. 1.3: Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna se skokovým indexem lomu a šíření paprsků ve vlákně [3].

**S postupnou změnou indexu lomu** se využívají na delší vzdálenosti. Nedá se u nich nalézt rozhraní mezi jádrem a pláštěm, protože jednotlivé skloviny jsou v sobě rozpuštěny. Světlo se zde šíří pomocí ohybu světla. Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna s postupnou změnou indexu lomu a šíření paprsku je znázorněn na obr. 1.4.

Pro navázání optického paprsku do vlákna se využívá mezního úhlu. Mezní úhel je největší možný úhel dopadu paprsku na optický vlnovod, při kterém ještě nastává lom vlnění. Pro komunikaci se využívá totálního odrazu paprsku na rozhraní dvou různých prostředí. Tato prostředí mají odlišný index lomu. Jádro vlákna má index



Obr. 1.4: Profil navázání paprsku do mnohavidového vlákna s postupným indexem lomu a šíření paprsků ve vlákně [3].

lomu  $n_1$  a plášť vlákna má index lomu  $n_2$ . K tomu, aby došlo k totálnímu odrazu, použijeme vzorec 1.1 a musí platit, že  $n_1 > n_2$ , kde paprsek vstupuje do jádra pod úhlem menším než  $\Theta$ .

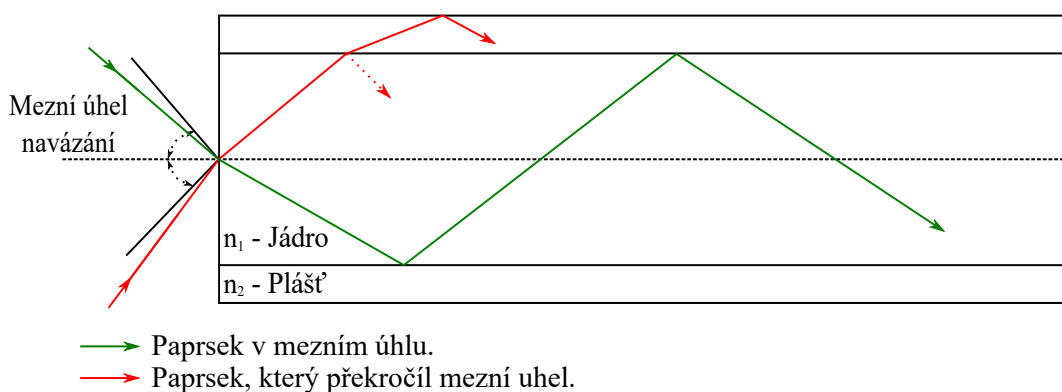
$$\cos\Theta = \frac{n_1}{n_2}, \quad (1.1)$$

kde  $\Theta$  je mezní úhel,

$n_1$  je index lomu jádra,

$n_2$  je index lomu pláště.

Vstup paprsku do vlnovodu a jeho průběh je znázorněn na obr. 1.5. Pokud nejsou podmínky splněny, tak dojde při vstupu paprsku do vlnovodu ke klasickému lomu paprsku, kde část výkonu vysílaného paprsku je ztracena, a také se ztrácí při každém odrazu do pláště až celý paprsek zanikne [4].



Obr. 1.5: Navázání paprsku do optického vlákna.

## 1.2 Měření optických tras

Pro měření optických sítí a optických komponent se používají tři metody měření:

**Metoda dvou délek** je nejpřesnější metodou pro měření útlumu optických tras.

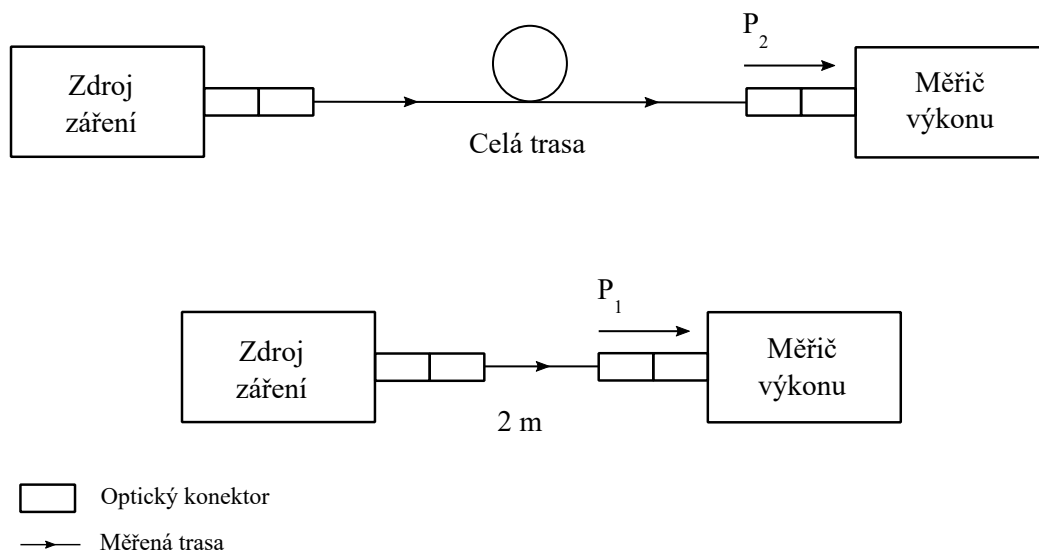
Měřená trasa je zapojena podle obr. 1.6. V prvním kroku je změřen výstupní výkon  $P_2$  po průchodu celým vláknem. V druhém kroku se cca 2 metry od generátoru vlákno zlomí a připojením detektoru změříme vstupní výkon  $P_1$ . Během obou kroků by měly být zachovány stejné podmínky. Z naměřených hodnot výkonu stanovíme pomocí vzorce 1.2 útlum měřené trasy [5], [6].

$$a(\lambda) = \frac{P_1}{P_2}, \quad (1.2)$$

kde  $a(\lambda)$  je útlum trasy na dané vlnové délce [dB],

$P_1$  je výkon navázaný do vlákna na začátku trasy [W],

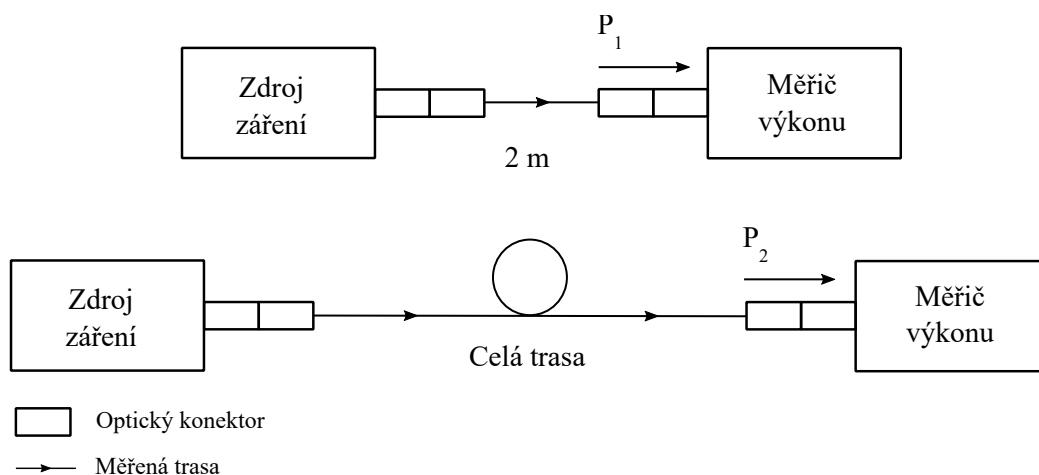
$P_2$  je výkon vyvázaný na konci trasy [W].



Obr. 1.6: Měření útlumu pomocí metody dvou délek [6].

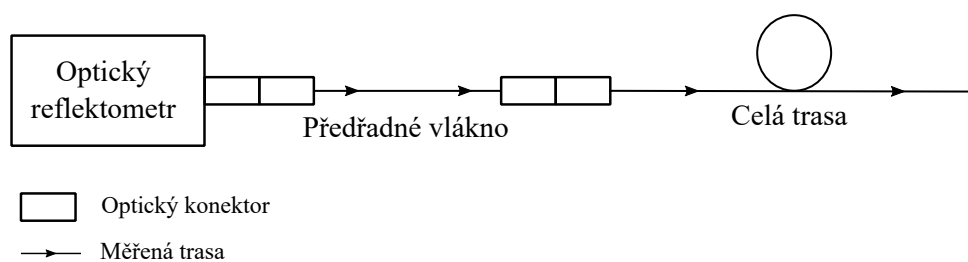
**Metoda vložných ztrát** je velice podobná metodě dvou délek, ale nedochází u ní k lámání vláken. V první kroku se změří vstupní výkon  $P_1$  pomocí dva metry dlouhého vlákna podle obr. 1.7. Ve druhém kroku se krátké vlákno nahradí měřenou trasou a změří se výstupní výkon  $P_2$ . Z naměřených hodnot výkonu stanovíme pomocí vzorce 1.2 útlum měřené trasy. Tato metoda se používá tam, kde není možné zkracovat vlákno jako u měření optických součástek a spojek [5], [6].

**Metoda zpětného rozptylu** je měřicí metodou využívající odrazu části optického výkonu signálu při průchodu světlovodem. Při průchodu světla vláknem dochází ke dvěma druhům odrazů. Rayleighův rozptyl určuje postupnou ztrátu



Obr. 1.7: Měření útlumu pomocí metody vložných ztrát [6].

energie způsobenou útlumem vlákna a Fresnelovy odrazy určují polohu a útlum zařazených konektorů, použitých svárů, porušení či přerušení vlákna díky změnám, ke kterým dochází při dopadu světla na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu. Schéma měření metodou zpětného rozptylu je na obr. 1.8. Metoda zpětného rozptylu má nejnižší přesnost, ale má obrovskou výhodu v tom, že se dá měřit celá trasa z jednoho konce měřené trasy. Pro měření pomocí této metody je dobré využívat předřadné vlákno. To je vlákno, které je dlouhé v řádech stovek metrů bez spojek a svárů, které se vloží mezi měřicí přístroj a měřenou trasu, díky tomuto vláknu se bude lépe vyhodnocovat měřená trasa už od prvního spoje [5], [6].



Obr. 1.8: Měření útlumu pomocí metody zpětného rozptylu [6].

## 2 Optické a optoelektronické komponenty

Pro přenos informací v optickém vlákně nám slouží světelný paprsek. Při přenosu informací za pomoci optického paprsku nevznikají magnetická ani elektrická pole, která ovlivňují komunikaci v metalických mediích.

Pro komunikaci za pomoci optického kabelu jsou zapotřebí prvky jako je *optický vysílač*, který slouží k převodu elektrického signálu na optický. Dále *optický přijímač*, který slouží ke zpětnému převodu optického paprsku na elektrický signál, a také *modulátory*, které slouží k řízení toku optického signálu. Tato zařízení ke své práci využívají elektrické signály, jsou označována jako aktivní. Zařízení jsou podrobněji popsána v kapitole 2.2.

Dále jsou zapotřebí pasivní komponenty, tedy komponenty, které nevyužívají elektrického signálu. Mezi nejdůležitější patří *dělič výkonu*, který rozděljuje vstupní optický signál na více výstupů. Jako další důležitý prvek je možné zařadit *optický izolátor*, který slouží především k ochraně optického vysílače před zpětným odrazem světla. V neposlední řadě nesmí být opomenut *optický cirkulátor*, který slouží k zajištění šíření optického paprsku ve správném směru. Tyto optické komponenty jsou podrobněji popsány v kapitole 2.1.

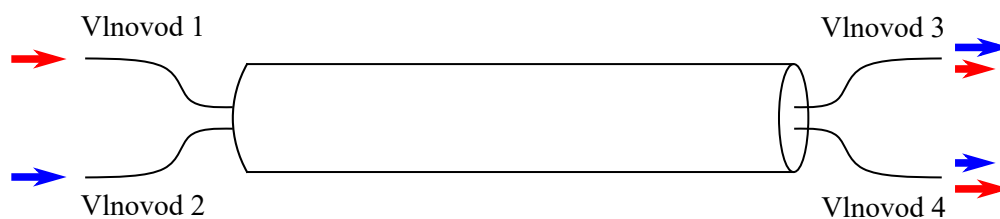
### 2.1 Optické komponenty

Optické komponenty jsou prvky, které pro svou činnost nepotřebují připojení k napájení ze sítě elektrických rozvodů. Převážně to jsou prvky, kterými už optický signál prochází, jejich úkolem je propojení prvků sítě nebo rozbočení optického signálu [5], [7].

#### 2.1.1 Dělič výkonu

V optických sítích se děliče výkonu používají k rozdělení vstupního signálu na dva nebo více signálů výstupních. Je také možné mít více vstupních signálů, které jsou rozděleny na více výstupních signálů. Je možné vstupní signály slučovat do jednoho výstupního vlákna [5]. Základní schéma děliče výkonu je na obr. 2.1.

Dělič výkonu se využívají k rozdělení optických tras pro jejich nízkou výkonovou ztrátu, vysokou spolehlivost, jejich nezávislost na přenosových technologiích, a také pro to, že pro jejich nasazení není potřeba elektrická energie. Nevýhodou je, že při průchodu děličem výkonu je signál v určitém poměru zeslaben, pokud tedy trasa nemá dostatečnou výkonovou rezervu, bylo by možné, že dojde ke ztrátě optického paprsku, a proto by bylo nutné použít optický opakovací signálu [9].



Obr. 2.1: Schéma optického děliče výkonu [8].

Dělič výkonu je obvykle směrovou součástkou, znamená to, že paprsek na vstupu děliče je pouze směrován na jeho výstupy a žádný signál se nemůže vrátit zpět. Děliče výkonu jsou buď závislé na vlnové délce, to znamená, že jsou určeny pouze pro využití při určité vlnové délce a vysílaný paprsek na jiné vlnové délce nelze přenést bez větších ztrát vysílané energie. Nebo pracují jako optické multiplexery a optické demultiplexery. Multiplexery většinou realizují vlnový multiplex, kde se využívá šíření více optických svazků po více vlnových délkách. Multiplexer sdružuje více světelných signálů do jednoho, demultiplexer následně vykonává opačný úkol [10].

### Základní parametry sledované u děliče výkonu

**Dělicí poměr** Je poměr, podle kterého se rozděljuje vstupní optický výkon na výstupní vlákna. Dělicí poměr mezi výstupní vlákna se udává v procentech [5].

**Vložný útlum součástky** Útlum je ztráta výkonu, ke kterému dochází uvnitř děliče výkonu. Tedy se jedná o ztrátu energie, ke které dochází mezi vstupním vlnovodem a vlnovody výstupními. Vložný útlum součástky se udává v decibelech [5].

**Vlnová délka signálu** Je potřeba u děličů výkonu sledovat, na jaké vlnové délce umí nejlépe pracovat, má pro ni nejnižší ztráty a nejpřesnější dělicí poměr [5].

### Typy děličů výkonu

Děliče výkonu můžeme dělit podle konstrukce na typ Y, T, hvězdu a WDM (Wavelength division multiplex), nebo podle konstrukce na fúzní a planární.

**Typ Y** Tento typ děliče výkonu jednoduše rozdělí vstupní signál na dva signály výstupní. Výstupní poměr výkonu může být stejný, ale nemusí tomu tak být, standardně se vyrábí v poměru 70:30, 90:10 nebo 50:50, ale výroba jiných výkonů není technicky nemožná [8], [11].

**Typ T** Typ děliče T má obdobné vlastnosti jako typ děliče Y, ale slouží především ke kaskádovitému zapojení aktivních prvků v síti. Většinou se tedy vyskytuje v poměru 90:10 nebo 80:20, aby zbyl dostatek výkonu pro následující prvky [8].

**Typ Hvězda** Hvězdicový typ má více vstupů a výstupů. Mohou mít stejný počet vstupů a výstupů, ale je možné, aby se lišily. Hvězdicové typy mohou být směrové. To znamená, že vstupní signál je směrován na všechny porty výstupní a na vstupní nikoliv. Mohou také být nesměrové, to znamená, že vstupní signál je rozeslán na všechny ostatní porty. Porty jsou v tomto případě jak vstupní, tak výstupní. Hvězdicové děliče výkonu je vhodné používat u více jak tří nebo čtyř dělení výkonu oproti děličům typu Y nebo T, a to z důvodu nižšího útlumu, jelikož dělení proběhne jednou [8], [11].

**Typ Strom** Děliče typu Strom využívají jeden, maximálně dva vstupy. Signál následně rovnoměrně dělí mezi více výstupů. Existují také verze, které mají více vstupů a signál slučují na jeden nebo dva výstupy. Stromové děliče se ve velké míře používají u optických částí kabelových televizí [8], [11].

**WDM** Děliče WDM oddělují optické signály podle jejich vlnových délek. Vypadají jako děliče Y nebo T, ale nerozdělují výkon, ale rozdělují dvě různé vlnové délky na dva výstupy, například děliče 1310/1550 nm a 980/1550 nm [8], [11].

**Fúzní metoda** Při této metodě se děliče vytváří ze dvou samostatných optických vláken. Vláknata jsou zbavena všech ochranných vrstev a za pomoci počítače svařena nebo spájena do sebe a zároveň napínána. V dalším kroku je jedno vstupní vlákno zkráceno takovým způsobem, aby došlo k minimalizaci útlumu zpětného odrazu. Tato metoda se v dnešní době takřka už nevyužívá [12].

**Planární metoda** U této metody je nejdříve vyrobeno chemicky čisté křemenné sklo, které je následně nařezáno na velmi tenké podkladové destičky. Tyto destičky jsou následně dále opracovány přesným leštěním do podoby základní destičky pro planární čip. V dalším kroku jsou na destičky nanášeny jednotlivých děličů fotonografickou cestou. Chemický proces destičky přemění na vlnovody. Následně jsou na destičku napojeny vstupní a výstupní vlnovody. Tato metoda je v současnosti nejpoužívanější [12].

## 2.1.2 Izolátor

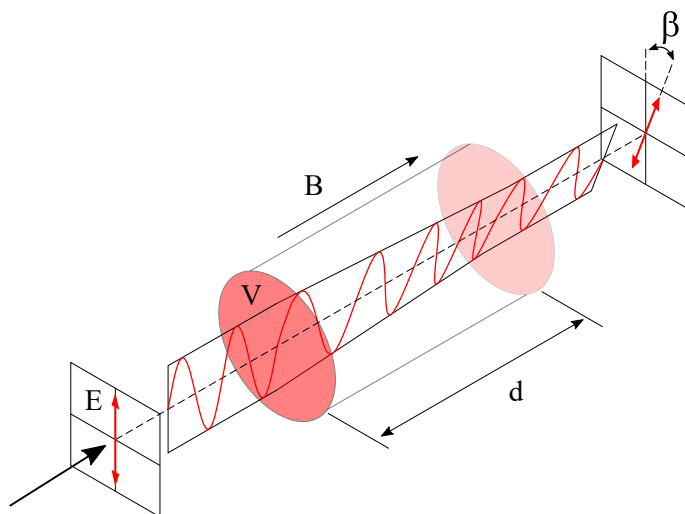
Optické izolátory jsou pasivní součástky, které zařizují, aby se světlo ve vlnovodu šířilo jenom jedním směrem. Slouží k ochraně zdroje záření před zpětnými odrazy

optického signálu, které by mohly zdroj záření poškodit nebo ovlivnit vysílané signály. Jeho hlavní využití se nachází v optických zesilovačích na vysokorychlostních trasách, kde je schopen eliminovat nepříznivé účinky zpětného záření [13].

Funkce izolátoru vychází z Faradayovy rotace, jedná se o magnetooptický jev, který nastává ve vhodném prostředí, kde za působení podélného magnetického pole dochází ke stáčení roviny lineárně polarizovaného světla. Znázornění stáčení polarizovaného paprsku pomocí Faradayova efektu je na obr. 2.2. Míra stočení polarizační roviny je přímo úměrná dráze  $d$ , po které se světlo v daném prostředí šíří a velikosti složky vektoru magnetické indukce  $B$  ve směru šíření světla. Orientace vektoru pak určuje smysl stáčení polarizační roviny. Velikost úhlu rotace  $\beta$ , o který se rovina polarizace otočí, vypočítáme ze vztahu

$$\beta = V B d, \quad (2.1)$$

kde koeficientem úměrnosti  $V$  je takzvaná Verdetova konstanta, charakteristická pro dané prostředí (materiálová charakteristika). Z teorie plyne, že Verdetova konstanta závisí na vlnové délce světla [14], [15].



Obr. 2.2: Znázornění stáčení polarizovaného paprsku pomocí Faradayova efektu [15].

Optický izolátor se skládá ze vstupního polarizátoru a Faradayova rotátoru, který je navržený ke stáčení polarizační roviny právě o úhel  $45^\circ$ . Polarizátor se stará o oddělení vracejících se paprsků, které jsou stočené o pravý úhel,  $2 \cdot 45^\circ$  [14], [15].

### Základní parametry sledované u izolátoru

**Izolace** Izolace nám udává hodnotu oddělení úrovní na portech izolátoru, hodnota se udává v decibelech. Čím je menší hodnota rušení na portech izolátoru, tím je hodnota izolace vyšší [5].



**Vložný útlum součástky** Útlum je ztráta výkonu, ke kterému dochází uvnitř děliče výkonu. Tedy se jedná o ztrátu energie, ke které dochází mezi vstupním vlnovodem a vlnovodem výstupním. Vložný útlum součástky se udává v decibelech [5].

**Vlnová délka signálu** Je potřeba u izolátorů sledovat, s jakou vlnovou délkou umí nejlépe pracovat, má pro ni nejnižší ztráty a nejlepší hodnotu izolace [5].

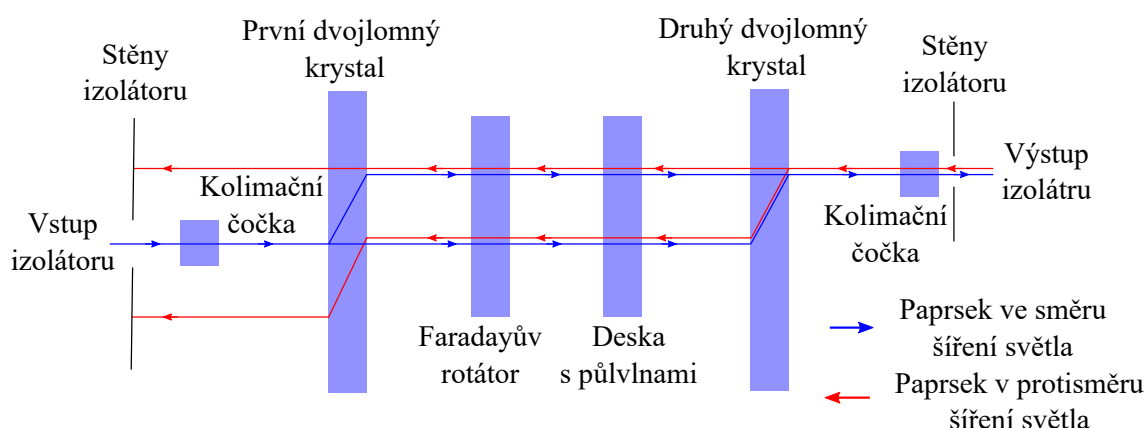
## Typy izolátorů

Izolátory dělíme podle toho, jestli jsou závislé na polarizaci nebo nejsou, pokud jsou závislé na polarizaci, tak je dále dělíme podle šířky pásma [14].

**Nezávislé na polarizaci** Faradayův izolátor nezávislý na polarizaci je zařízení, které pracuje pro libovolnou polarizaci vstupního paprsku. Taková zařízení jsou často vyžadována v kontextu vláknové optiky, protože mnoho vláken neuchovává polarizaci. Zejména optické vláknové komunikační systémy jsou obvykle provozovány s nedefinovaným stavem polarizace a pro práci s libovolnými stavy polarizace jsou poté požadovány Faradayovy izolátory a další komponenty [14], [15].

Polarizačně nezávislý Faradayův izolátor je znázorněn na obr. 2.3. Vstupní paprsek je rozdělen do dvou paprsků prvním dvojlomným krystalem. Následně prochází přes Faradayův rotátor a dvojlomný krystal. Posunuté paprsky se následně spojí pomocí druhého dvojlomného krystalu.

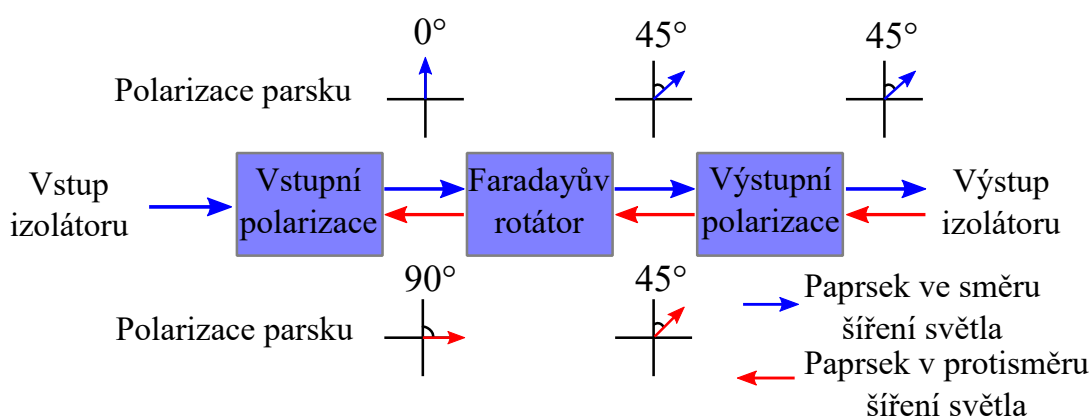
Paprsek zpětného odrazu ve zpětném režimu se nejdříve setká s druhým dvojlomným krystalem, který paprsek rozdělí na dva paprsky s polarizací zarovnanou s paprskem v režimu šíření. Faradayův rotátor je nerekiproční, a tedy vyruší rotaci, poté paprsek dojde k prvnímu dvojlomnému krystalu, který paprsek odkloní do stěn izolátoru [14].



Obr. 2.3: Izolátor nezávislý na polarizaci [14].

**Závislé na polarizaci** Izolátor závislý na polarizaci je považován za nejjednodušší typ Faradayova izolátoru, který je polarizačně citlivý v tom smyslu, že funguje pouze tehdy, když má vstupní paprsek předepsaný směr lineární polarizace. Zde správně polarizovaný a kolimovaný vstupní paprsek prochází prvním polarizátorem, který je znázorněn na obr. 2.4 s minimální ztrátou, následně Faradayovým rotátorem a nakonec dalším polarizátorem s pootočenou osou paprsku o  $45^\circ$  [14], [15].

Když se světelný paprsek odráží zpět do výstupního portu izolátoru s nezměněným stavem polarizace, může plně přenášet výstupní polarizátor. Poté se však jeho směr polarizace ve Faradayově rotátoru otočí o dalších  $45^\circ$ , a tedy už je otočen o  $90^\circ$ , takže tento světelný paprsek bude blokován na vstupním polarizátoru nebo může být směřován na samostatný výstupní port.



Obr. 2.4: Izolátor závislý na polarizaci [14].

Izolátory, které jsou závislé na polarizaci, následně dělíme podle pracovní šířky pásma do tří kategorií:

**Pevný úzkopásmový izolátor** Je izolátor, který u předepsané vlnové délky má nastavenou rotaci o  $45^\circ$ . Při dodržení předepsané vlnové délky se postará o maximální izolaci. Při změně vlnové délky izolace klesá. Izolátor neumožňuje žádné ladění, jedná se o nejlevnější typ izolátoru a má pevný rotátor i polarizátory [16].

**Nastavitelný úzkopásmový izolátor** Je izolátor, který u předepsané vlnové délky má nastavenou rotaci o  $45^\circ$ . Při dodržení předepsané vlnové délky se postará o maximální izolaci. Při změně vlnové délky izolace klesá, ale umožňuje otočení výstupního polarizátoru pro vycentrování izolační křivky pro zpětné získání maximální izolace. Rotace způsobí ztráty přenosu ve směru šíření, které se zvyšují s rostoucím rozdílem mezi použitou a vyrovnávanou vlnovou délkou. Izolátor je univerzální, má pevné prvky rotátoru a umožňuje nastavení polarizátorů [16].

**Pevný širokopásmový izolátor** Je izolátor, který u předepsané vlnové délky má nastavený Faradayův rotátor na  $45^\circ$ , který je následovaný krystalovým rotátorem, který se také stará o posun o  $45^\circ$ . Tyto dva rotátory nám na výstupu zajistí spojenou rotaci o  $90^\circ$ , díky dvou rozdílným materiálům rotátorů vzniká izolátor se skoro plochým vstupním povrchem. Při dodržení předepsané vlnové délky se postará o maximální izolaci. Při změně vlnové délky izolace klesá. Izolátor neumožňuje žádné ladění, má nejvyšší šířku pásma izolace a má pevné rotátory i polarizátory [16].

**Nastavitelný širokopásmový izolátor** Je izolátor, který u předepsané vlnové délky má nastavený Faradayův rotátor na  $45^\circ$ . Izolátor obsahuje ladící kroužek, který upravuje hodnotu materiálu v rotátoru vloženého do magnetu. Při dodržení předepsané vlnové délky se postará o maximální izolaci. Při změně se použije ladící kroužek pro dosažení rotace o  $45^\circ$ . Izolátor umožňuje ladění za pomoci ladícího kroužku, a tedy má nastavitelný prvek rotátoru a má pevné polarizátory [16].

**Tandemový izolátor** Je izolátor, který obsahuje dva Faradayovy rotátory nastavené na  $45^\circ$  v sérii. Oba rotátory sdílejí stejný polarizátor. Jelikož se rotátory navzájem ruší, tak úhel na výstupu je  $0^\circ$ . Izolátor umožňuje ladění za pomoci ladícího kroužku, a tedy nastavitelný prvek rotátoru, má pevné polarizátory [16].

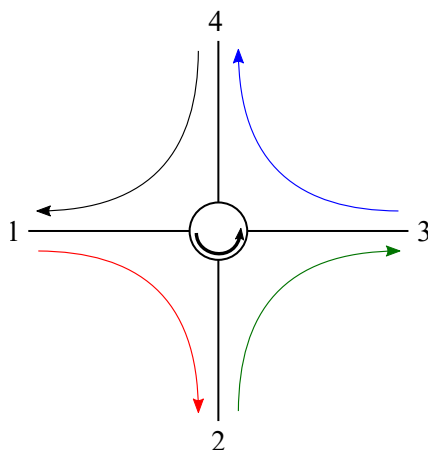
### 2.1.3 Cirkulátor

Optický cirkulátor se řadí mezi pasivní optické součástky. Umí rozdělit optický signál podle jeho směru šíření. Optický signál, který přichází na první port cirkulátoru, je směřován na druhý port. Optický signál, který přichází na druhý port cirkulátoru, je směřován na třetí port. Obdobně se pokračuje pokud cirkulátor má více portů, ale většinou se cirkulátor využívá se třemi porty. Využívá se většinou v měřících přístrojích, které využívají metodu zpětného rozptylu, nebo v systémech WDM a DWDM (Dense wavelength division multiplexing), také se využívá v zesilovačích signálu [7], [17].

Optický cirkulátor zahrnuje komponenty Faradayova rotátoru, dvojlomného krystalu a vlnovou desku. Faradayův rotátor využívá Faradayův efekt, což je jev, při kterém se za pomoci polarizace světelného paprsku otáčí v materiálu pod magnetickým polem aplikovaným rovnoběžně se směrem šíření světelného paprsku. Šíření světla v dvojlomném krystalu závisí na stavu polarizace světelného paprsku a relativní orientaci krystalu. Polarizaci paprsku lze změnit nebo lze paprsek rozdělit na dva paprsky s ortogonálními polarizačními stavy [18].

Znázornění principu čtyřportového cirkulátoru je na obr. 2.5, kde na portu jedna vchází paprsek, který je směřován pouze na druhý port, z druhého portu je paprsek

směrován pouze na třetí port, ze třetí portu je paprsek směřován pouze na čtvrtý port, ze čtvrtého je paprsek směřován zpět na první port. Směrování paprsku ze čtvrtého portu na první port nemusí být vždy [18]. Rozdělení cirkulátorů je popsáno v kap. 2.1.3.



Obr. 2.5: Princip čtyřportového cirkulátoru.

### Základní parametry sledované u cirkulátoru

**Přeslech** Přeslech je nežádoucí jev, který nastává u optického cirkulátoru mezi prvním a posledním portem [19].

**Vložný útlum součástky** Útlum je ztráta výkonu, ke kterému dochází uvnitř cirkulátoru. Tedy se jedná o ztrátu energie, ke které dochází mezi vstupním vlnovodem a vlnovodem výstupním. Vložný útlum součástky se udává v decibelech [5].

**Vlnová délka signálu** Je potřeba u cirkulátorů sledovat, na jaké vlnové délce umí nejlépe pracovat, má pro ni nejnižší ztráty a nejlepší hodnotu izolace [5].

### Typy cirkulátorů

Cirkulátory dělíme na dva druhy podle jejich funkčnosti.

**Plně oběhové** Zde optický cirkulátor pro oběh paprsku využívá všechny porty. Světelný paprsek, který byl navázán do prvního portu, vchází do portu druhého, z druhého portu do třetího portu a takto postupuje až do posledního. Následně z posledního portu do portu prvního [18].

**Částečně oběhové** Chová se obdobně jako plně oběhový cirkulátor, jen s tím rozdílem, že paprsek z posledního portu nevychází do portu prvního, ale je ztracen [18].

## 2.2 optoelektronické komponenty

optoelektronické komponenty jsou prvky, které pro svou činnost potřebují připojení k napájení ze sítě elektrických rozvodů. Jsou to prvky, které svou funkcí mají za následek aktivní ovlivnění signálů. Převádí elektrický signál na optický, zesilují ho nebo mají na starost zpětný převod optického na signál elektrický [20].

### 2.2.1 Laserová dioda

Laserové diody jsou polovodičové součástky, které slouží v optických sítích jako vysílače paprsku, který má být navázán do vlnovodu z důvodu přenosu informace. Laserový paprsek má velmi malou rozbíhavost a díky této vlastnosti se dá dosáhnout vysoké hodnoty zářivosti. Je monochromatický, a tedy je směřován do úzkého intervalu vlnových délek. Je do jisté míry koherentní.

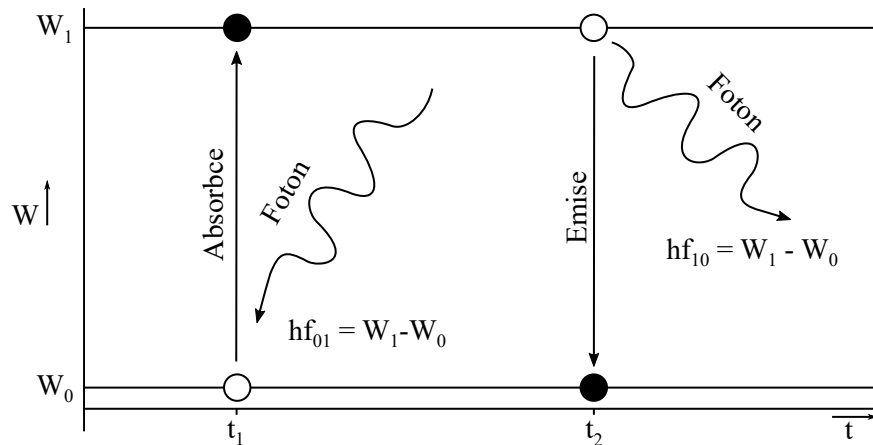
Samotné záření vzniká za předpokladu, že fotonu v aktivním prostředí je dodána energie, která je dostačující pro přesun do vyšší úrovně. Elektron v této hladině vydrží velmi krátkou dobu, a to  $10^{-3}$  až  $10^{-7}$  sekundy. Následně se vrací do stavu s minimální energií a dochází k záření, kterému se říká emise [21]. Emise rozeznáváme dvojího typu, a to spontánní nebo stimulovanou. Stimulovaná emise je základní funkcí laserových diod.

#### Spontánní emise

Když přes přechod  $PN^1$  v přímém směru prochází nízký proud, tak dochází ke generování spontánního záření šířícího se ve všech směrech s náhodnou fází. Vyrůstající proud zvyšuje rychlost zářivé rekombinace, která vede k růstu hustoty fotonového toku. Fotony, které jsou stimulovány, generují další rekombinace. Největší počet generovaných fotonů má energii rovnou energii maxima spektrálního rozdělení spontánní emise, která je znázorněna na obr. 2.6, kde se jedná o přeskok elektronu mezi stejně vzdálenými energetickými hladinami  $W_0$  a  $W_1$ , vyzáří se světelné množství, které má stejnou energii jako to, které bylo v okamžiku  $t_1$  absorbováno. Pro tuto energii nastává nejvíce vynucených přechodů ve srovnání s jinými oblastmi spektrálního rozdělení. To následně vede k postupnému zužování spektra spontánní emise a výraznému růstu intenzity vyzařování v oblasti maxima spektrálního rozdělení. Proces superluminiscence se nazývá proces, při kterém roste intenzita vyzařování nelineárně s růstem buzení. V tomto procesu generované fotony se šíří stejně jako ve spontánním režimu ve všech směrech s náhodnou fází [21].

---

<sup>1</sup>PN přechod je rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N a vzniká difúzí materiálu typu P do materiálu typu N.



Obr. 2.6: Spontánní emise [21].

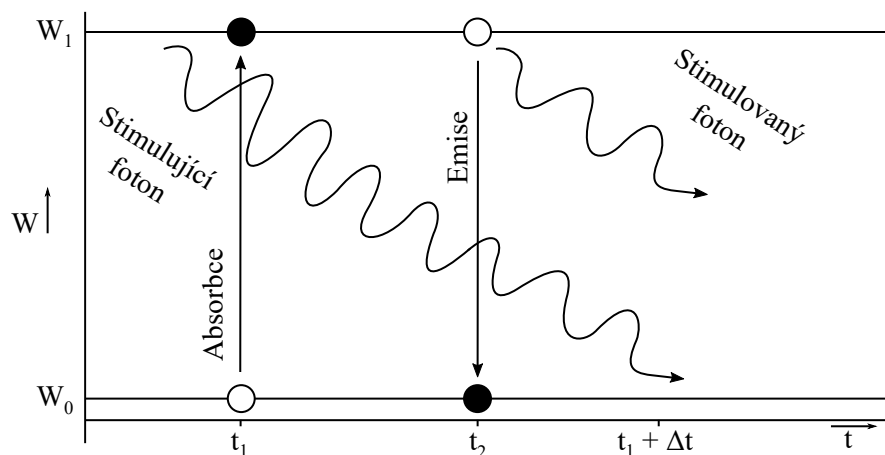
### Stimulovaná emise

Stimulovaná emise, která je znázorněna na obr. 2.7, kde stimulující foton prochází kvantovou soustavou energetických hladin, když v čase  $t_1$  je elektron vybuzen do vyšší energetické hladiny. Prolétající foton v čase  $t_2$  vybuzený elektron přesune zpět do základního stavu dřív, než dojde k spontánní emisi a vyzáří přitom stimulovaný foton se stejnými vlastnostmi jako foton stimulující. Stimulovaná emise nastává, když se stimulované zesílení rovná ztrátám a záření se stává koherentním. Pro dosažení koherence se využívá optický rezonátor. Ten zajišťuje selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitou frekvencí a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Kvalita rezonátoru udává stupeň koherence. V polovodičových krystalech jsou aktivní atomy hustě vedle sebe a zářivé přechody se neuskutečňují mezi diskrétními energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. Nejnížší energetické hladiny ve vodivostním pásu jsou obsazovány elektrony až po Fermiho kvazihladinu, která je pro elektrony  $E_{fn}$ . Ve valenčním pásu jsou stavy bez elektronů až po Fermiho kvazihladinu pro díry  $E_{fp}$ . Při dopadu fotonů na polovodič s energií větší než  $E_g$ , ale menší než  $E_{fn} - E_{fp}$ , nemůže dojít k jejich absorpci, protože hladiny, na něž by se mohl uskutečnit přechod spojený s pohlcením fotonu, jsou již obsazeny. Dopadající fotony tedy mohou stimulovat přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu s následnou emisí nerozlišitelných fotonů od budících [21]. Podmínkou pro jejich stimulaci je [21]:

$$E_g < hn < E_{fn} - E_{fp} \quad (2.2)$$

V důsledku zavedení kladné zpětné vazby dochází ke generování optického záření, které část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. K tomuto účelu se používají různé typy rezonátorů, selektivních odrazečů nebo rozložené zpětné vazby. V sou-

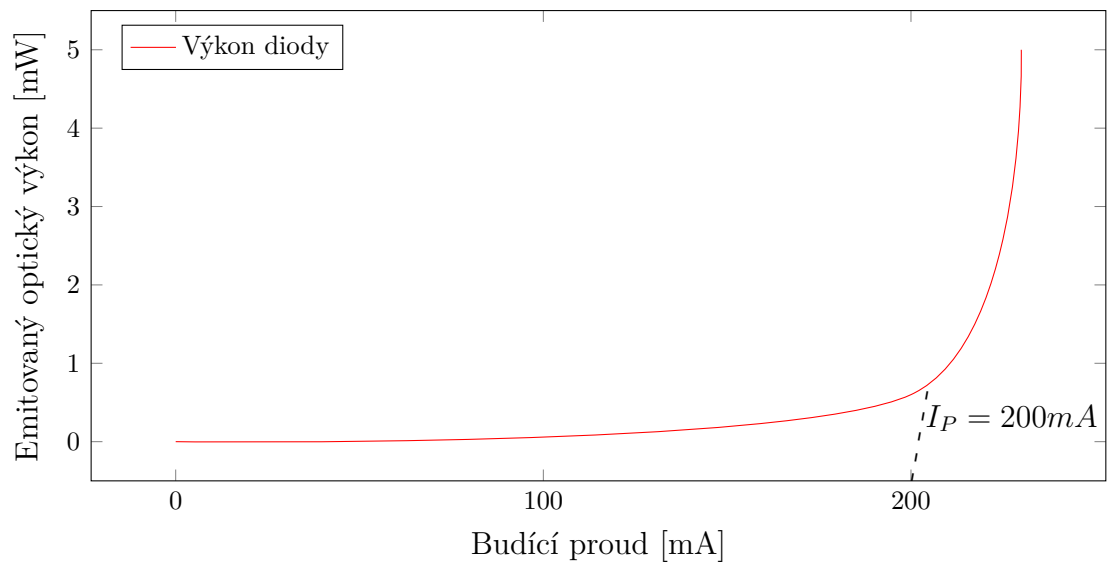
časnosti je nejpoužívanějším rezonátorem v laserových diodách Fabry – Perotův rezonátor. Polovodičový krystal – vzduch má poměrně vysoký index lomu rozhraní, který má hodnotu pro GaAs (arsenid gallia)  $n_r = 3,34$ , tak se nemusí u laserových diod využívat speciální zrcadla, ale stačí využít odrazu elektromagnetické vlny od rozhraní. Podmínkou realizace takového rezonátoru je pak vzájemná rovnoběžnost dvou protilehlých stěn polovodičového laseru a jejich kolmost k rovině přechodu PN. V kubických krystalech se zrcadla rezonátoru získávají štípáním orientovaných polovodičových destiček s přechodem PN podél krystalografických rovin [21].



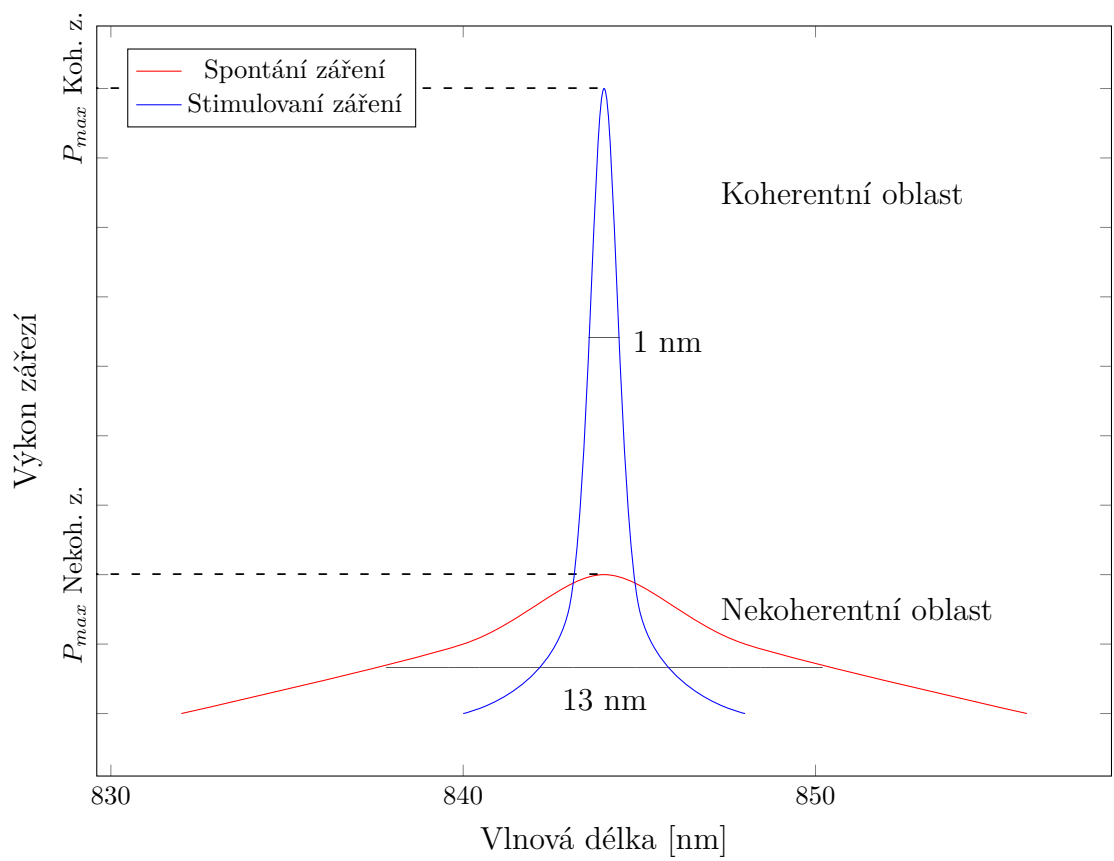
Obr. 2.7: Stimulovaná emise [21].

Úzká oblast energie čerpání, při níž dochází k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise, se nazývá práh. U laserových diod máme prahovou hustotu budícího proudu respektive prahový proud  $I_P$  a laserová dioda při něm přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru [21], který je znázorněn na obr. 2.8.

Když dosáhneme prahového proudu  $I_P$ , tak prudce narůstá výkon stimulovaného záření, které mění tvar vyzařovací charakteristiky, která je vyjádřena zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN [21]. Také dochází ke zmenšení šířky pásma, které je znázorněno na obr. 2.9.



Obr. 2.8: Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu [21].



Obr. 2.9: Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu [21].



## Základní parametry sledované u laserových diod

**Watt-Ampérová charakteristika** Nejdůležitější charakteristikou laserové diody je závislost jejího optického výkonu na procházejícím proudu. Když zvyšujeme procházející proud, dochází nejdříve ke generování spontánní emise. Pokud je dosaženo prahového proudu  $I_P$ , tak následně dojde k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise. Dochází ke změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody vyjádřené zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN, intenzita vycházejícího světla se začne prudce zvyšovat a spektrální šířka se výrazně zúží, laserová dioda pak svítí monochromatickým koherentním světlem, jehož intenzita je lineární funkcí budícího proudu [22].

**Prahový proud** Je hodnota proudu, při kterém dioda přechází ze spontánní emise do emise stimulované [22].

**Charakteristická teplota** Udává závislost prahového proudu na teplotě. Pro její určení je právě nutné měření ve dvou různých teplotách. Vychází ze vzorce 2.3,

$$T_0[^\circ\text{C}] = \frac{(T_h - T_l)}{\ln\left(\frac{I_{Ph}}{I_{Pl}}\right)}, \quad (2.3)$$

kde  $T_h$  je vysoká teplota  $[^\circ\text{C}]$ ,

$T_l$  je nízká teplota  $[^\circ\text{C}]$ ,

$I_{Ph}$  je prahový proud při vysoké teplotě  $[\text{A}]$ ,

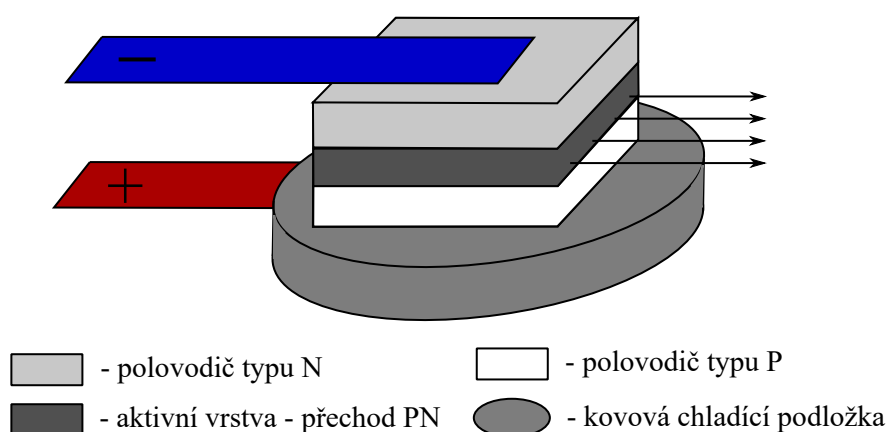
$I_{Pl}$  je prahový proud při vysoké teplotě  $[\text{A}]$  [22].

**Spektrum** Udává vlnové délky, na kterých dioda vyzařuje. U laserové diody jsou velmi úzké, a to desetiny až jednotky nm, oproti LED diodám, které mají až 100 nm, což dovoluje přenos po optickém vlákně na velké vzdálenosti bez zkreslení signálu. Z počátku spektrum mělo jeden hlavní vrchol a několik vrcholů postranních. Tato vlastnost byla nežádoucí a byla částečně potlačena tím, že se při výrobě rezonátorů nevyužívala zrcadla [22].

## Typy laserových diod

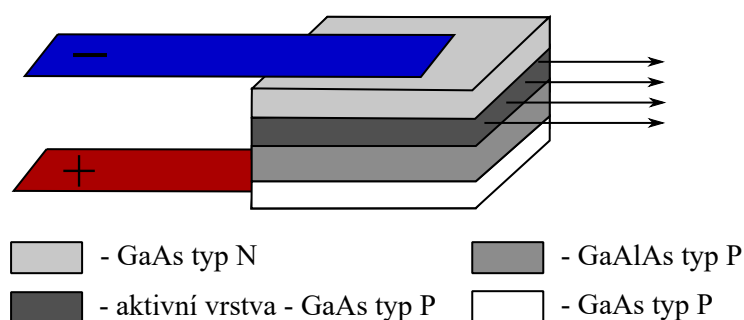
Laserové diody můžeme dělit podle vnitřní struktury na homostrukturální, heterostrukturální, s rozloženou zpětnou vazbou nebo s kvantovými jámami. Také podle jejich konstrukce místa vyzáření na EEL (Edge emitting lasers - hranově vyzařující lasery) a VCSEL (Vertical cavity surface emitting lasers - plošně vyzařující lasery).

**Homostrukturální** Na homostrukturálním laseru bylo poprvé dosaženo emise koherentního záření. Je tvořen z PN přechodu, velké šířky aktivní vrstvy, která má  $1 - 3 \mu\text{m}$  pro silně dopovaný GaAs a je dána difúzní délkou menšinových nosičů. Neexistuje zde výrazná změna indexu lomu, která by ovlivňovala optické soustředění. Má malou účinnost z důvodu velkých tepelných ztrát do okolních vrstev polovodiče. Z toho důvodu musí být dostatečně chlazen [23]. Jeho náčrt je znázorněn na obr. 2.10.



Obr. 2.10: Homostrukturální laser [23].

**Heterostrukturální** U laseru s heteropřechody je vymezení vlnovodu dáno skokovou změnou indexu lomu v oblasti heteropřechodu. Heteropřechod je rozhraní mezi polovodivými materiály, které na sebe plynule navazují na úrovni krystalové mřížky. Podle počtu heteropřechodů dělíme heterostrukturální lasery na lasery s jednou heterostrukturou nebo s dvojitou heterostrukturou [23].

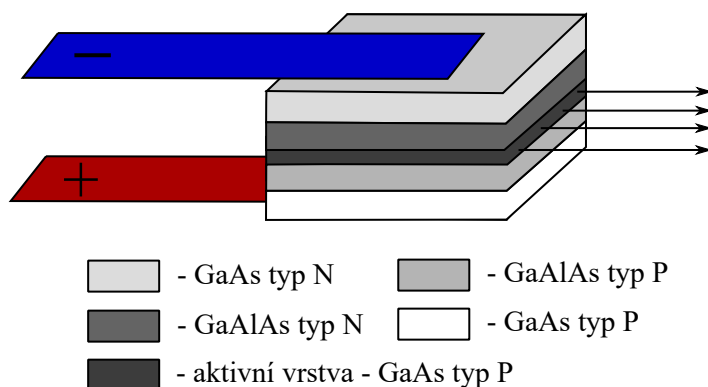


Obr. 2.11: Heterostrukturální laser s jednoduchou heterostrukturou [23].

**S jednoduchou heterostrukturou** Skoková změna je zde mnohem větší než u homostrukturálních laserů. Jedna vrstva má jiné chemické složení než její spodní

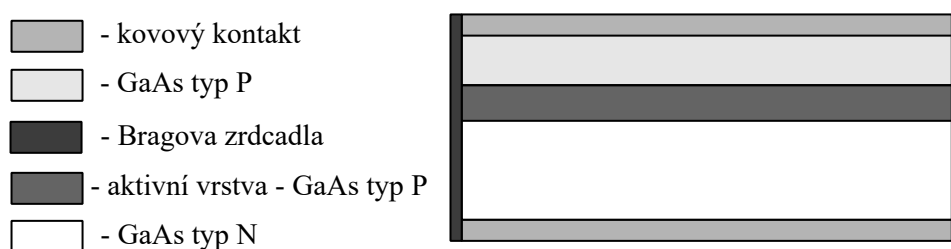
vrstva, jak je znázorněno na obr. 2.11. Jedna ze stěn tedy vytváří vlnovod a současně i potenciálovou bariéru, soustřeďující nosiče uvnitř aktivní vrstvy typu P [23].

**S dvojitou heterostrukturou** Zde jde aktivní plocha obklopena z obou stran vrstvami, jak je znázorněno na obr. 2.12, které mají větší šířku zakázaného pásu, a proto jsou nosiče náboje i optického záření soustředěny do aktivní oblasti z obou stran. Nedochází zde tolik k nežádoucím ztrátám, a proto má větší účinnost a menší tepelné ztráty. Účinnost těchto laserů se pohybuje okolo 75 % [23], [24].



Obr. 2.12: Heterostrukturální laser s dvojitou heterostrukturou [23].

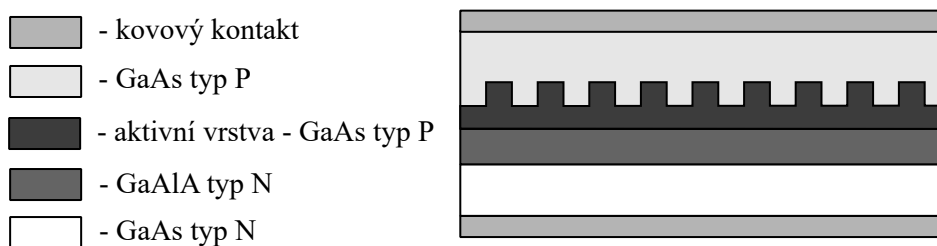
**Fabry – Perot** FP (Fabry – Perot) obsahuje dvojitou heterostrukturou, ve které se nachází kvantové jamky. Rezonátor obsahuje reflexní zrcadla na obou stranách, jak je znázorněn na obr. 2.13. Když světlo dosáhne jednoho ze zrcadel, část světla se odráží zpět k aktivaci jako signál optické zpětné vazby [24].



Obr. 2.13: Fabry – Perot laser [24].

**S rozprostřenou zpětnou vazbou** Funkce DFB (Distributed feedback laser) laseru je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vzniká trvalým navázáním šířící se vlny do opačného směru Braggovým rozptylem. Rezonátor je realizován pomocí prostorových periodických struktur a bez zrcadel,

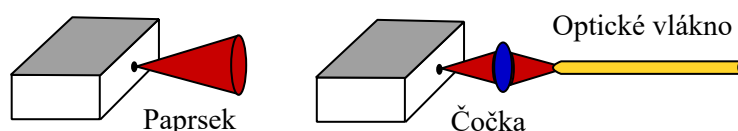
je znázorněn na obr. 2.14. Jsou vhodné jako zdroje záření pro pásma 1300 nm až 1550 nm. Z důvodu nahrazení Fabryho – Perotova rezonátoru optickou mřížkou umožňují jednomódový provoz [23].



Obr. 2.14: Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou [23].

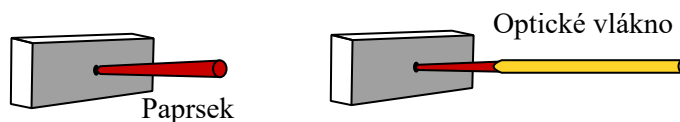
**S kvantovými jámami** Má dvojitou heterostrukturu a má tak tenkou aktivní vrstvu, která se liší složením, že se při generaci optického záření uplatňují kvantové jevy podmíněné její tloušťkou, která je standardně 10 nm. Prahové proudy jsou přibližně v rozmezí od desetin mA po několik málo desítek mA a účinnost těchto typů laserů může překročit až 80 % [23], [25].

**Hranově vyzařující** Laserová dioda s touto konstrukcí vysílá záření z hrany přechodu, jak je znázorněno na obr. 2.15, kde je také znázorněno navázání paprsku do optického vlákna pomocí čočky. Nevýhodou u tohoto typu je, že jejich testování může probíhat až po kompletaci. Pokud dojde k nějaké závadě při výrobě mezi kontakty jednotlivých vrstev, tak na nefunkčnost se přijde až po kompletaci. Mají nižší účinnost oproti plošně vyzařujícím laserovým diodám [23].



Obr. 2.15: Hranově vyzařující laser a navázání paprsku do optického vlákna pomocí čočky [23].

**Plošně vyzařující** Laserový paprsek je generovaný z plochy součástky rovnoběžně s rovinou přechodu, jak je znázorněno na obr. 2.16, kde je také znázorněno navázání paprsku do optického vlákna. Má vyšší účinnost oproti hranově vyzařujícím laserovým diodám, jejich účinnost je až 80 %. Jejich výhodou je i v možnosti testování v průběhu výroby [23], [25].



Obr. 2.16: Plošně vyzařující laser a navázání paprsku do optického vlákna [23].

## 2.2.2 Fotodetektor

Fotodetektory jsou polovodičové součástky, které slouží v optických sítích jako přijímače optického signálu, který vychází z vlnovodu s přenášenou informací a mají za úkol převod signálu na odpovídající elektrický signál. Pro komunikace v optických sítích se převážně používají fotodiody, pro jejich citlivost a přesnost. Fotodiody jsou založené na snímání elektromagnetického záření a využívají principu fotoelektrického jevu, při kterém dochází k absorpci dopadajících fotonů s energií rovnou nebo větší, než je šířka zakázaného pásu materiálu. Z pohledu konstrukce rozeznáváme čtyři druhy fotodiod, a to PN, PIN, Schottkyho typu a APD (Avalanche Photodiode – lavinová fotodioda). Každá fotodioda může pracovat v jiném spektru a proto se využívá možnosti dvoubarevných detektorů, kde fotodioda obsahuje dva různé fotosenzory, kde jeden senzor je namontovaný přes druhý podél stejné optické osy. Každý z nich je citlivý na jinou spektrální oblast a celá součástka tak dokáže detekovat široké spektrum záření [26].

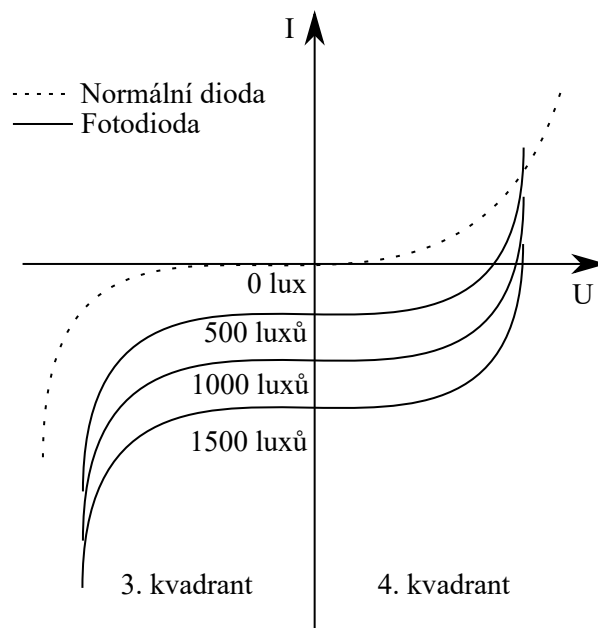
### Základní parametry sledované u fotodiod

**Volt–Ampérová charakteristika** rozeznáváme dva základní režimy Volt–Ampérové charakteristiky, které jsou znázorněné na obr. 2.17, jedná se o:

**Fotovoltaiický režim** kdy fotodioda pracuje ve čtvrtém kvadrantu Volt–Ampérové charakteristiky. Jedná se o pasivní režim, kdy nepotřebuje závěrné předpětí. Tento režim má úzkou oblast prostorového náboje, malé vnitřní pole a fotony které jsou absorbovány mimo vyprázdněnou oblast [27], [28].

**Fotovodivostní režim** kdy fotodioda pracuje ve třetím kvadrantu Volt–Ampérové charakteristiky. Je zde rychlejší pohyb nosičů náboje, větší oblast prostorového náboje, menší kapacita přechodu a lineární odezva [27], [28].

**Kvantová účinnost** je definována poměrem počtu  $N_{el}$  nosičů proudu generovaných do obvodu a počtem fotonů  $N_{ph}$  dopadajících na aktivní plochu fotodiody, výsledná hodnota vychází ze vzorce 2.4 [29],



Obr. 2.17: Volt–Ampérová charakteristika fotodiody [27], [28].

$$\eta[\%] = \frac{N_{el}}{N_{ph}} = \frac{hc}{\epsilon\lambda} \cdot R \quad (2.4)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,

$c$  je rychlost světla,

$\epsilon$  je velikost elementárního náboje,

$\lambda$  je vlnová délka dopadajícího záření,

$R$  je citlivost fotodetektoru.

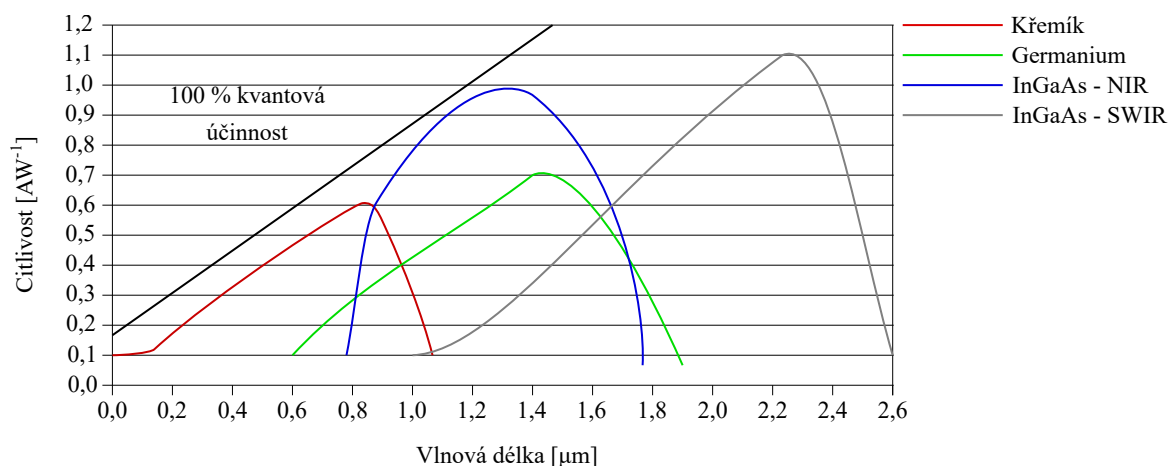
**Citlivost** je poměr výstupního proudu fotodiody a přijímané světelné energie [28]. Vychází ze vzorce 2.5,

$$E[AW^{-1}] = \frac{I_f}{P}, \quad (2.5)$$

kde  $I_f$  je přijímaná světelná energie [ $W/cm^2$ ],

$P$  světelná energie [ $A/cm^2$ ].

Nejčastěji používané materiály jsou křemík, germanium, InGaAs (Indium gallium arsenide) pro NIR (nanometr infra red - blízké infračervené záření) a InGaAs pro SWIR (short wave infra red - infračervené záření krátké vlnové délky) [28]. Hodnoty jsou znázorněny na obr. 2.18.



Obr. 2.18: Znázornění citlivosti fotodiody v závislosti na materiálu a vlnové délce dopadajícího záření [27].

**Šířka pásma** určuje oblast harmonických frekvencí, které jsou detekovány bez výrazného útlumu. Obvykle se uvažuje 3 dB šířka pásma představující maximální dovolený pokles přenosu na polovinu [30].

**Doba náběhu** nám udává dobu za kterou vzroste signál na výstupu z 10 % na 90 % hodnoty signálu, po vstupu signálu na vstup [30].

**Proud za tmy** udává fotoproud generovaný diodou ve fotovodivostním režimu bez přítomnosti dopadajícího záření. Hodnoty temného proudu závisí na materiálu fotodiody, její konstrukci a absolutní velikosti záporného předpětí. Signály ležící pod úrovní temného proudu jsou nerozlišitelné [30].

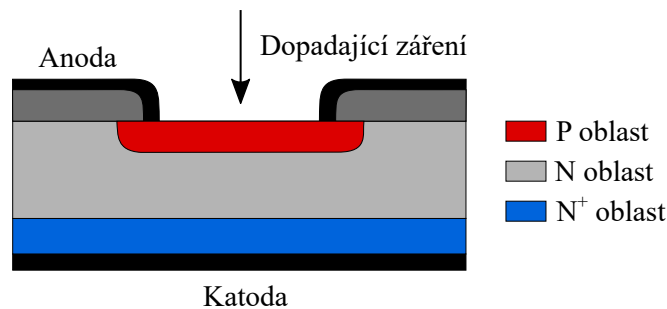
**Ekvivalentní šumový výkon** udává minimální použitý optický výkon nutný pro překonání úrovně citlivosti, kdy poměr signálu a šumu je roven jedné [31].

## Typy fotodiód

Fotodiody dělíme podle vnitřní struktury na PN, PIN bez modulované bariéry, PIN s modulovanou bariérou, lavinové fotodiody a Schottkyho fotodiody.

**PN** Je plošná polovodičová dioda upravená tak, aby do oblasti PN přechodu mohlo pronikat světelné záření, jedná se o první formu fotodiody, reaguje velmi rychle na změnu fotonového toku v rozmezí  $10^{-10} - 10^{-6}$  sekundy [26] a je znázorněna na obr. 2.19.

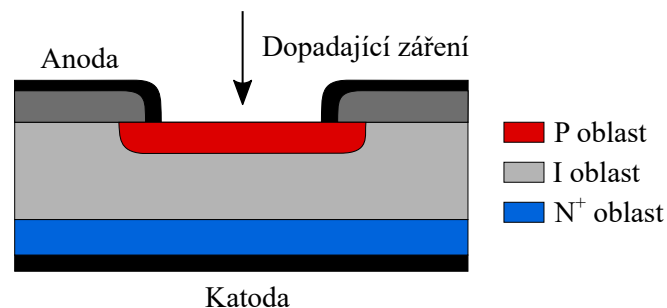
**PIN** U fotodiody typu PIN rozlišujeme dva druhy a je znázorněna na obr. 2.20:



Obr. 2.19: Schéma PN fotodiody [26].

**Bez modulované bariéry** jsou vysoce dopované oblasti  $P$  a  $N$  odděleny širokou málo dopovanou oblastí  $I$ . U tohoto typu diod se dosahuje lepší frekvenční charakteristiky a citlivosti v oblasti dlouhovlnné oblasti spektra. Oproti fotodiodám PN mají kratší dobu odezvy. Nevýhodou je generace teplotně závislého proudu za tmy, který způsobuje šum a zhoršuje měření s nízkou úrovní [26].

**S modulovanou bariérou** se liší od klasické fotodiody PIN tím, že zvyšuje svůj zisk, tím že se snižuje bariéra pro zachycování minoritních děr. Aktivní vrstva GaAs je překryta vrstvou GaAlAs se širším zakázaným pásem, která je pro dopadající záření transparentní [26].

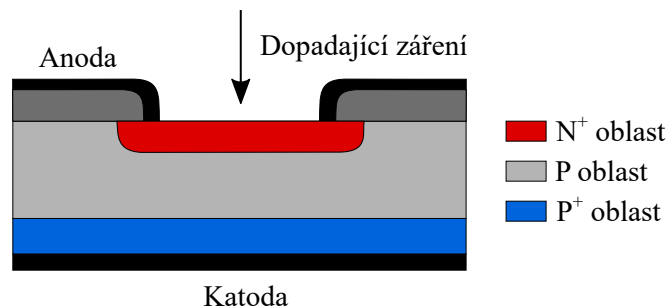


Obr. 2.20: Schéma PIN diody [25].

**APD** Na rozdíl od fotodiody PN nebo PIN vykazuje vlastní zesílení. V lavinových fotodiodách je oblast s vysokým elektrickým polem, které urychluje generované nosiče náboje natolik, že při srážce s mřížkou krystalu polovodiče dojde k vytvoření dalších elektronových dvojic a tím roste citlivost diody. Z důvodu její vyšší citlivosti potřebuje vyšší provozní napětí ze stabilizovaného zdroje [25] a je znázorněna na obr. 2.21.

**Schottkyho** O vedení proudu se starají pouze majoritní nositelé a při difúzi se na okrajích hradlové vrstvy neakumulují minoritní nositelé, díky tomu je doba mezi



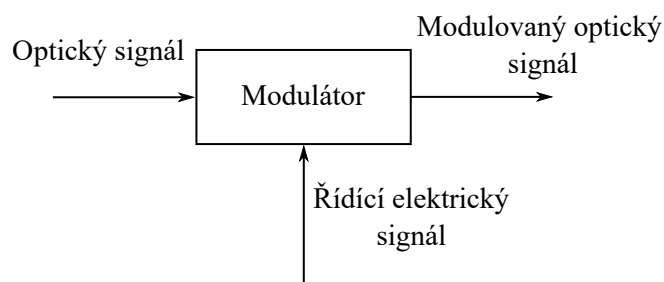


Obr. 2.21: Schéma Lavinové fotodiody [26].

vznikem a zánikem hradlové vrstvy nižší než u ostatních fotodiody. Využívá usměrňujících účinku styku polovodiče a kovu. Polovodičem bývá nejčastěji křemík nebo GaAs typu N a kovem zlato nebo hliník. Schottkyho dioda využívá menší napětí v propustném směru a vyšší závěrný proud. Z těchto důvodů se může využívat k usměrňování malých napětí s vysokou frekvencí [26].

### 2.2.3 Modulátor

Elektrooptický modulátor slouží k modulaci vstupního signálu. Modulace je proces v čase, při kterém se mění charakter vstupního optického signálu pomocí modulujícího elektrického signálu. Slouží k řízení výkonu, fáze nebo polarizace světelného paprsku jak je znázorněno na obr. 2.22. Princip činnosti je založen na lineárním elektrooptickém efektu a proto obsahuje jednu nebo dvě Pockelsovy cely, případně polarizátory nebo další optické prvky. V tomto případě mluvíme o externí modulaci, kde světlo prochází externím zařízením, jehož přenosové vlastnosti jsou ovlivněny modulačním signálem. Jeho primární funkcí je vtisknout informaci na světelnou vlnu za použití dočasných změn jedné ze svých vlastností. Tato zařízení jsou zpravidla navržena pro jednomódové zdroje [32].



Obr. 2.22: Základní princip modulátoru.

## Základní parametry sledované u modulátorů

**Hloubka modulace** Udává poměr změny výstupního signálu po modulaci pomocí elektrického signálu, oproti vstupnímu nemodulovanému signálu [32].

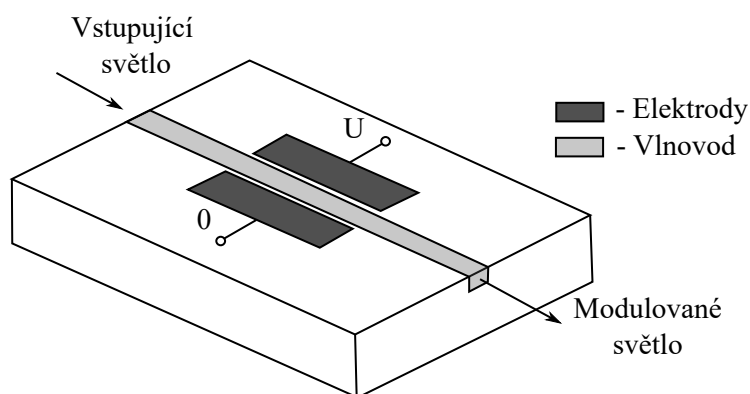
**Šířka pásma** Určuje rozsah frekvencí, se kterou je modulátor schopen pracovat. Šířka pásma se bere jako rozdíl mezi horní frekvencí a dolní frekvencí, kdy modulační hloubka je do 50 % maximální hodnoty [32].

**Vložený útlum součástky** Útlum je ztráta výkonu, ke kterému dochází uvnitř modulátoru. Tedy se jedná o ztrátu energie, ke které dochází mezi vstupním vlnovodem a vlnovodem výstupním. Vložený útlum součástky se udává v decibelech.

## Typy modulátorů

Modulátory dělíme podle druhu jejich modulace na fázové modulátory, polarizační modulátory, modulátory amplitudy, intezity a akusticko-optické modulátory.

**Fáze** Tyto modulátory představují nejjednodušší typ elektrooptického modulátoru, který obsahuje Pockelsovy cely, kde elektrické pole mění fázové zpoždění laserového paprsku vysílaného přes krystal. Polarizační stav světla se průchodem krystalu nemění, protože je zarovnán s některou z optických os krystalu pomocí polarizátoru. Rychlost, s jakou může být modulátor provozován, je omezená dobou průchodu světelného paprsku a elektrickými kapacitními efekty, v důsledku toho se mění i možná modulovaná šířka pásma [32], [33]. Fázový modulátor je znázorněn na obr. 2.23.

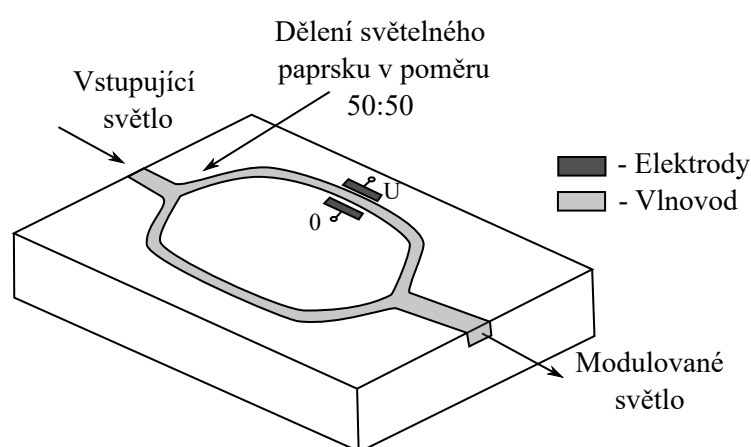


Obr. 2.23: Základní princip modulátoru [34].

**Polarizace** Pro modulaci polarizace se využívá anizotropní prostředí, kde pomocí přivedeného napětí je možné měnit výstupní polarizaci při vedení dvou světelných

paprsků. Základní prvky jsou vstupní polarizátor a elektrooptický krystal, ve kterém se jinou rychlostí šíří světelná vlna v ose x a v ose y. Rozdíl od fázové modulace je v tom, že vstupní polarizátor je umístěn tak, že světelný vstup rozloží rovnoměrně mezi obě osy [32], [33].

**Amplitudy a intezity** Optickou intenzitu můžeme pomocí modulátoru řídit několika způsoby. Může se využít dynamického optického zpomalení za pomoci křížového polarizátoru. Dalším způsobem může být využití optického zpomalení s paralelním polarizátorem na výstupu. Posledním způsobem může být rozdělení paprsku do dvou větví, kde u jednoho paprsku dochází k fázovému posuvu vlny a druhá větev se nemění [32] [33], jak je znázorněno na obr. 2.24.



Obr. 2.24: Modulátor intenzity [34].

**Akusto-optické** používají se na přepínání nebo nepřetržité nastavování amplitudy laserového paprsku, na posouvání jeho optické frekvence nebo jeho prostorového směru za pomoci zvukových vln [35].

## 3 Měření optických a optoelektronických komponent

V první části praktické části jsou změřeny hodnoty optických komponent a to nejdříve děliče výkonu, následně cirkulátoru a jako poslední bude změřen izolátor. Ve druhé části je u laserové diody změřena spektrální charakteristika záření, spektrální šířka a mezní hodnota proudu. U fotodetektoru je změřena frekvenční charakteristika a u modulátoru jsou ověřeny jeho modulační schopnosti a změřeno zkosení náběžných hran.

### 3.1 Měření optických komponent

Pro měření optických komponent byla použita metoda vložných ztrát, která je pro měření nejvhodnější. Tato metoda je přesnější než metoda zpětného rozptylu a nedochází k zalamování vlákna jako u metody dvou délek [5]. Před každým měřením byly optické komponenty očištěny pomocí čistícího pera. Také byly očištěny konektory na propojovacích kabelech. Jako zdroj záření byl použit vysílací laser FOLS-101 a pro měření výkonu byl použit měřicí přístroj FOPM-102. Nejdříve před každým měřením byla provedena kalibrace přístrojů a následně referenční měření za pomoci optického vlákna s délkou dva metry, které bylo z jedné strany zakončeno pomocí konektorů SC/APC a z druhé strany SC/UPC a pomocí spojky na SC konektory. Měření komponent probíhalo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm, a proto referenční měření bylo uskutečněno pro obě vlnové délky. Následně byly odměřeny všechny optické komponenty. Jeden port optické komponenty se připojil na vysílací laser a druhý port se připojil na měřič výkonu. Vysílací laser, měřicí přístroj a měřená komponenta se propojily pomocí referenčního vlákna a optických spojek. Byly proměřeny všechny možné dvojice konektorů. Nejdříve byly měřeny děliče výkonu, u kterých byl změřen vložný útlum a izolace. Vložný útlum se měří jako rozdíl signálu na vstupním portu a příslušném portu výstupním. Izolace se měří mezi vstupním a výstupními porty, aby signál šel jen na příslušný výstupní port. Následně byly odměřeny cirkulátory, u kterých byl navíc změřen přeslech. Přeslech se měří mezi prvním a posledním portem. Jako poslední byl změřen izolátor, u kterého byla změřena jeho izolace a vložný útlum. Na obr. 3.1 je znázorněna kalibrace vysílacího laseru FOLS-101 a měřiče výkonu FOPM-102. Na obr. 1.7 je znázorněno schématické zapojení, které bylo použito pro měření.



Obr. 3.1: Kalibrace vysílacího laseru FOLS-101 a měřiče výkonu FOPM-102.

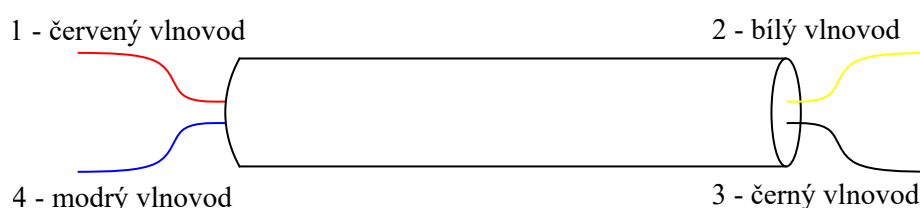
### 3.1.1 Dělič výkonu

Jako první součástka byl odměřen dělič výkonu. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulek. Následně byly hodnoty přepočítány na wattly pro zjištění dělicího poměru. Referenční hodnota útlumu laseru pro vlnovou délku 1310 nm a 1550 nm je uvedena u tabulek s výsledky. Katalogové hodnoty měřených děličů výkonu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Katalogové hodnoty měřených děličů výkonu.

Sériové číslo	Pracovní vlnová délka [nm]	Vložný útlum [dB]	Dělicí poměr [%:%]
72658742	1310 – 1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
72658887	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
72658029	1550 ± 20	$\leq 6,4 / \leq 4,3$	60:40
72658855	1310 – 1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
72658807	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
A160022688	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
A160056586	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
A150210657	1550 ± 20	24/0,4	99:1
A140062957	1310 – 1550 ± 20	$\leq 12,7 / \leq 0,8$	90:10
A160056553	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
A160056545	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50
A150210665	1550 ± 20	$\leq 12,7 / 0,8$	90:10
17012588	1550 ± 20	$\leq 3,6$	50:50

Schéma zapojení děličů výkonu se sériovými čísly 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma zapojení děličů výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807.

Naměřené hodnoty vložného útlumu pro děliče výkonu se sériovými čísly 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty je v tab. 3.2 a pro vlnovou délku je v tab. 3.3. Kompletní tabulky jsou v příloze A. Pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658887 pro vlnovou délku 1550 nm je tabulka uvedena kompletní z důvodu vyššího vložného útlumu a jeho vysvětlení.

Tab. 3.2: Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty.

Sériové číslo	Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]
72658742	1	2	-10,27	3,36
		3	-10,25	3,34
7265887	1	2	-10,94	4,22
		3	-11,96	5,25
72658029	1	2	-15,18	8,36
		3	-10,37	3,55
72658855	1	2	-10,25	3,48
		3	-10,29	3,52
72658807	1	2	-10,52	3,66
		3	-11,20	4,34

Tab. 3.3: Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: 72658742, 72658887, 72658029, 72658855 a 72658807 při vlnové délce 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty.

Sériové číslo	Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]
72658742	1	2	-10,14	3,00
		3	-10,32	3,18
72658887	1	2	-10,49	3,46
		3	-11,54	4,51
72658029	1	2	-14,09	7,09
		3	-12,00	4,99
72658855	1	2	-10,66	3,75
		3	-10,72	3,81
72658807	1	2	-9,76	2,78
		3	-9,68	2,70

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658742 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.1, jeho dělicí poměr je v tab. 3.4. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.2, jeho dělicí poměr je v tab. 3.5. Naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám.

Tab. 3.4: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	93,97	49,88
1	3	94,41	50,12
2	1	96,83	50,98
2	4	93,11	49,02
3	1	99,08	50,23
3	4	98,17	49,77
4	2	90,16	48,96
4	3	93,97	51,04

Tab. 3.5: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	96,83	51,04
1	3	92,90	48,96
2	1	97,27	50,75
2	4	94,40	49,25
3	1	91,62	49,14
3	4	94,84	50,86
4	2	86,10	49,77
4	3	86,90	50,23



Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658887 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,72 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.3, jeho dělicí poměr je v tab. 3.6. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm jsou hodnoty v tab. 3.7, jeho dělicí poměr je v tab. 3.8. Nepřesný dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Zvýšený vložný útlum při použití třetího portu při vlnové délce 1550 nm mohl být způsoben například jeho poškozením. Jelikož byl port při každém použití očištěn, tak zvýšený vložný útlum z důvodu zašpinění je možné vyloučit.

Tab. 3.6: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,72 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	80,54	55,84
1	3	63,68	44,16
2	1	68,71	56,02
2	4	53,95	43,98
3	1	53,09	48,22
3	4	57,02	51,78
4	2	70,47	51,38
4	3	66,68	48,62

Tab. 3.7: Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,49	3,46	
1	3	-11,54	4,51	
1	4	-50,00		42,97
2	1	-10,00	2,97	
2	3	-50,00		42,97
2	4	-10,13	3,10	
3	1	-11,25	4,22	
3	2	-50,00		42,97
3	4	-10,99	3,95	
4	1	-50,00		42,97
4	2	-10,65	3,62	
4	3	-11,46	4,43	

Tab. 3.8: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	89,33	56,02
1	3	70,15	43,98
2	1	100	50,75
2	4	97,5	49,25
3	1	74,99	48,50
3	4	79,62	51,50
4	2	86,1	54,65
4	3	71,45	45,35

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658029 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.5, jeho dělicí poměr je v tab. 3.9. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,00 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.6, jeho dělicí poměr je v tab. 3.10. Mírně zvýšený vložný útlum mezi prvním a druhým a první a třetím portem byl možná částečně způsoben použitím druhé optické spojky oproti referenčnímu měření nebo se mohla stát nějaká z měřících chyb.

Tab. 3.9: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	30,34	24,83
1	3	91,83	75,17
2	1	40,55	36,95
2	4	69,18	63,05
3	1	106,66	64,42
3	4	58,88	35,57
4	2	122,75	66,20
4	3	62,66	33,80

Tab. 3.10: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,00 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	38,99	38,20
1	3	63,10	61,80
2	1	43,95	40,34
2	4	65,01	59,66
3	1	58,88	40,28
3	4	87,30	59,72
4	2	59,57	39,07
4	3	92,90	60,93

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658855 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,77 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.7, jeho dělicí poměr je v tab. 3.11. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.8, jeho dělicí poměr je v tab. 3.12. Naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám. Mírně zvýšený vložný útlum na některých portech mohl být způsoben použitím dvou spojek místo jedné spojky u referenčního měření.

Tab. 3.11: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,77 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	94,41	50,23
1	3	93,54	49,77
2	1	90,36	51,21
2	4	86,10	48,79
3	1	100	50,35
3	4	98,63	49,65
4	2	89,74	49,25
4	3	92,47	50,75

Tab. 3.12: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	85,90	50,35
1	3	84,72	49,65
2	1	85,31	49,94
2	4	85,51	50,06
3	1	94,19	48,91
3	4	81,40	51,09
4	2	91,83	49,42
4	3	93,97	50,58

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 72658807 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.9, jeho dělicí poměr je v tab. 3.13. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.10, jeho dělicí poměr je v tab. 3.14. Ne přesný dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám.

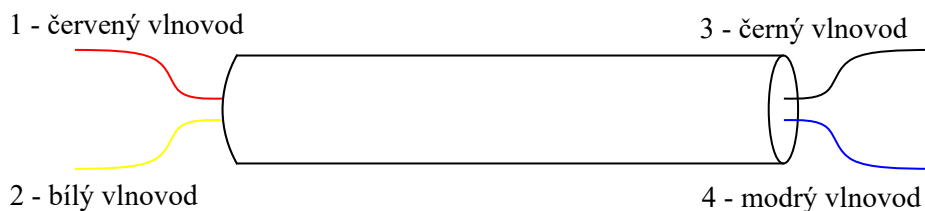
Tab. 3.13: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	88,72	53,91
1	3	75,86	46,09
2	1	107,15	61,80
2	3	66,22	38,20
3	1	76,56	47,99
3	4	82,99	52,01
4	2	73,11	41,00
4	3	105,20	59,00

Tab. 3.14: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	2	105,68	49,54
1	3	107,65	50,46
2	1	104,23	50,75
2	3	101,16	49,25
3	1	107,40	50,58
3	4	104,95	49,42
4	2	102,33	49,94
4	3	102,57	50,06

Schéma zapojení děličů výkonu se sériovými čísly A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 je na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma zapojení děličů výkonu se SN: A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665.

Naměřené hodnoty vložného útlumu pro děliče výkonu se sériovými čísly A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty je v tab. 3.15 a pro vlnovou délku 1550 nm je v tab. 3.16. Kompletní tabulky jsou v příloze A.

Tab. 3.15: Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 při vlnové délce 1310 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty.

Sériové číslo	Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]
A150210665		3	-18,51	11,77
		4	-7,37	0,63
A160056545	1	3	-10,90	4,10
		4	-9,95	3,16
A160056553	1	3	-9,36	2,53
		4	-10,84	4,08
A140062957	1	3	-8,5	1,71
		4	-18,08	11,29
A150210657	1	3	-46,08	39,25
		4	-18,22	11,39
A160022688	1	3	-21,25	14,39
		4	-22,45	15,59
A160056586	1	3	-10,76	3,68
		4	-10,60	3,52

Tab. 3.16: Vložný útlum pro děliče výkonu se SN:A160022688, A160056586, A150210657, A140062957, A160056553, A160056545 a A150210665 při vlnové délce 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty.

Sériové číslo	Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]
A150210665	1	3	-16,97	10,10
		4	-7,02	0,16
A160056545	1	3	-10,21	3,33
		4	-10,28	3,40
A160056553	1	3	-10,04	3,11
		4	-10,16	3,20
A140062957	1	3	-8,74	1,54
		4	-18,08	10,88
A150210657	1	3	-28,11	21,10
		4	-7,56	0,56
A160022688	1	3	-10,31	3,49
		4	-10,42	3,37
A160056586	1	3	-10,76	3,68
		4	-10,60	3,52

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A150210665 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,74 dBm jsou uvedeny v příloze v tab.A.11, jeho dělicí poměr je v tab. 3.17. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,87 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.12, jeho dělicí poměr je v tab. 3.18. Ne přesný dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám.

Tab. 3.17: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,74 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	14,09	7,14
1	4	183,23	92,86
2	3	181,13	92,02
2	4	15,7	7,98
3	1	13,77	7,49
3	2	170,22	92,51
4	1	175,39	92,26
4	2	14,72	7,74

Tab. 3.18: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,87 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	20,09	9,19
1	4	198,61	90,81
2	3	203,24	90,30
2	4	21,83	9,70
3	1	18,75	9,00
3	2	189,67	91,00
4	1	199,52	89,91
4	2	22,39	10,09



Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A160056545 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,80 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.13, jeho dělicí poměr je v tab. 3.19. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.14, jeho dělicí poměr je v tab. 3.20. Nepřesný dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám.

Tab. 3.19: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,80 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	81,28	44,55
1	4	101,16	55,45
2	3	115,35	60,22
2	4	76,21	39,78
3	1	75,34	42,07
3	2	103,75	57,93
4	1	111,43	57,77
4	2	81,47	42,23

Tab. 3.20: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	95,28	50,40
1	4	93,76	49,60
2	3	96,16	50,46
2	4	81,66	49,54
3	1	92,68	48,73
3	2	97,50	51,27
4	1	95,72	50,35
4	2	94,40	49,65

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A160056553 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.15, jeho dělicí poměr je v tab. 3.21. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,93 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.16, jeho dělicí poměr je v tab. 3.22. Ne přesný dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám.

Tab. 3.21: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	115,88	58,44
1	4	82,41	41,56
2	3	81,85	42,35
2	4	111,43	57,65
3	1	101,40	55,90
3	2	79,89	44,10
4	1	69,18	37,38
4	2	115,88	62,62

Tab. 3.22: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,93 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	99,08	50,69
1	4	96,38	49,31
2	3	96,16	49,14
2	4	99,54	50,86
3	1	93,11	49,48
3	2	95,06	50,52
4	1	95,71	49,25
4	2	98,63	50,75

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A140062957 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,79 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.17, jeho dělicí poměr je v tab. 3.23. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,2 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.18, jeho dělicí poměr je v tab. 3.24. Naměřený dělicí poměr odpovídá referenčnímu. Vložný útlum je mírně zvýšený, ale nemá vliv na dělicí poměr děliče výkonu.

Tab. 3.23: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,79 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	141,25	90,08
1	4	15,56	9,92
2	3	15,85	9,40
2	4	152,76	90,60
3	1	156,32	89,79
3	2	17,78	10,21
4	1	15,70	9,42
4	2	151,01	90,58

Tab. 3.24: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,2 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	13,37	91,15
1	4	1,30	8,85
2	3	1,51	10,53
2	4	12,79	89,46
3	1	13,12	89,91
3	2	1,47	10,09
4	1	1,23	9,00
4	2	12,45	91,00

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A150210657 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.19, jeho dělicí poměr je v tab. 3.25. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,01 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.20, jeho dělicí poměr je v tab. 3.26. Nepřesný dělicí poměr a zvýšený dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm je mírně zvýšený vložný útlum pro trasu na 99 % optického signálu, který mohl být způsoben další optickou spojkou oproti referenční trase, ale bez vlivu na poměr.

Tab. 3.25: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	0,02	0,16
1	4	15,07	99,84
2	3	15,63	99,84
2	4	0,02	0,16
3	1	0,02	0,15
3	2	10,57	99,84
4	1	11,59	99,86
4	2	0,02	0,14

Tab. 3.26: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,01 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	1,55	0,87
1	4	175,39	99,13
2	3	159,22	99,17
2	4	1,33	0,83
3	1	1,22	0,90
3	2	133,66	99,10
4	1	133,35	99,16
4	2	1,14	0,84

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A160022688 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.21, jeho dělicí poměr je v tab. 3.27. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.22, jeho dělicí poměr je v tab. 3.28. Ne přesný dělicí poměr a zvýšený dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm je mírně zvýšený vložný útlum, který mohl být způsoben další optickou spojkou oproti referenční trase, ale bez ovlivnění dělicího poměru.

Tab. 3.27: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	7,50	56,86
1	4	5,69	43,14
2	3	5,25	38,41
2	4	8,41	61,59
3	1	7,93	59,66
3	2	5,36	40,34
4	1	5,13	42,18
4	2	7,03	57,82

Tab. 3.28: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	93,11	50,63
1	4	90,78	49,37
2	3	81,10	49,83
2	4	81,66	50,17
3	1	91,47	49,65
3	2	82,60	50,35
4	1	92,26	50,06
4	2	92,04	49,94

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem A160056586 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,85 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.23, jeho dělicí poměr je v tab. 3.29. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.24, jeho dělicí poměr je v tab. 3.30. Ne přesný dělicí poměr a zvýšený dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm je mírně zvýšený vložný útlum, který mohl být způsoben další optickou spojkou oproti referenční trase, ale bez ovlivnění dělicího poměru.

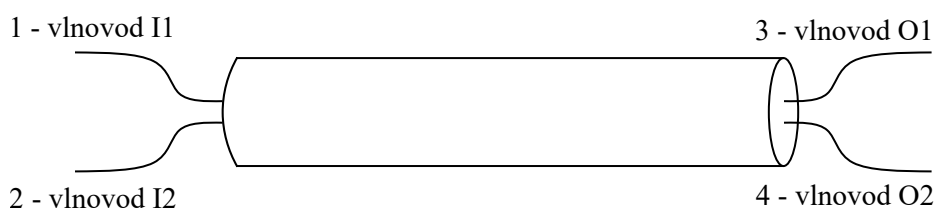
Tab. 3.29: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,85 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	106,17	65,63
1	4	55,59	34,37
2	3	65,16	37,55
2	4	108,39	62,45
3	1	59,84	35,46
3	2	108,89	64,54
4	1	59,16	36,90
4	2	101,16	63,10

Tab. 3.30: Dělicí poměr děliče výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
1	3	83,95	49,08
1	4	87,10	50,92
2	3	85,51	50,69
2	4	83,18	49,31
3	1	79,80	50,58
3	2	77,98	49,42
4	1	76,74	49,42
4	2	78,52	50,58

Schéma zapojení děliče výkonu se sériovým číslem 17012588 je na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Schéma zapojení děliče výkonu se SN: 17012588.

Naměřené hodnoty vložného útlumu pro dělič výkonu se sériovým číslem 17012588 při vlnové délce 1310 nm i 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty je v tab. 3.31. Kompletní tabulky jsou v příloze A.

Tab. 3.31: Vložný útlum pro děliče výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1310 nm i 1550 nm pro první jeden vstupní a dva výstupní porty.

Vlnová délka [nm]	Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]
1310	I1	O3	-19,18	12,30
		O4	-23,67	16,80
1550	I1	O3	-10,11	3,03
		O4	-10,09	3,01

Naměřené hodnoty pro dělič výkonu se sériovým číslem 17012588 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm jsou uvedeny v příloze v tab. A.25, jeho dělicí poměr je v tab. 3.32. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm jsou hodnoty v příloze v tab. A.26, jeho dělicí poměr je v tab. 3.33. Nepřesný dělicí poměr a zvýšený dělicí poměr u vlnové délky 1310 nm byl způsoben tím, že daný dělič výkonu nebyl pro danou vlnovou délku vytvořen. Pro vlnovou délku 1550 nm naměřené hodnoty odpovídají katalogovým.

Tab. 3.32: Dělicí poměr děliče výkonu se SN:17012588 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
I1	O3	12,08	73,77
I1	O4	4,30	26,23
I2	O3	3,94	23,65
I2	O4	12,71	76,35
O3	I1	10,50	69,81
O3	I2	4,54	30,19
O4	I1	3,65	19,89
O4	I2	14,69	80,11

Tab. 3.33: Dělicí poměr děliče výkonu se SN:17012588 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [ $\mu$ W]	Dělicí poměr [%]
I1	O3	97,499	49,88
I1	O4	97,95	50,12
I2	O3	114,03	49,14
I2	O4	118,03	50,86
O3	I1	106,66	50,63
O3	I2	103,99	49,37
O4	I1	114,82	49,60
O4	I2	116,68	50,40



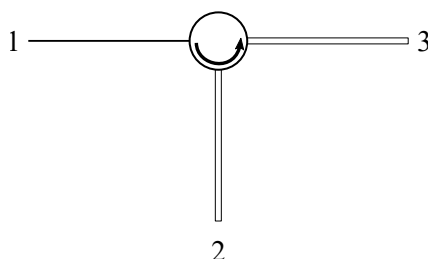
### 3.1.2 Cirkulátor

Jako další součástka byl odměřen cirkulátor. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulek. Referenční hodnota útlumu laseru pro vlnovou délku 1310 nm a 1550 nm je uvedena u tabulek s výsledky. Katalogové hodnoty měřených cirkulátorů jsou uvedeny v tab. 3.34.

Tab. 3.34: Katalogové hodnoty měřených cirkulátorů.

Sériové číslo	Pracovní vlnová délka [nm]	Vložný útlum [dB]	Izolace	Přeslech
A16000037	1280 - 1400	$\leq 1,5$	$\geq 36$	$\geq 50$
A16001129	1470 - 1610	$\leq 1,5$	$\geq 35$	$\geq 50$
90004659	1310 a 1550 $\pm 30$	$\leq 1,5$	$\geq 40$	$\geq 50$
18040064	1550 $\pm 20$	$\leq 1,5$	$\geq 35$	$\geq 42$
120900180	1525-1565	$\leq 1,5$	$\geq 35$	$\geq 50$

Schéma zapojení cirkulátorů se sériovými čísly A16000037, A16001129, 90004659 a 18040064 je na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Schéma zapojení cirkulátorů se SN: A16000037, A16001129, 90004659 a 18040064.

Naměřené hodnoty pro cirkulátor se sériovým číslem A16000037 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,97 dBm jsou uvedeny v tab. 3.35. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm jsou hodnoty v tab. 3.36. Katalogové hodnoty pro vlnovou délku 1310 nm odpovídají, mírně zvýšený vložný útlum ze druhého portu na třetí port mohl být způsoben druhou optickou spojkou oproti referenčnímu měření. Pro vlnovou délku 1550 nm nebyl cirkulátor vytvořen, a proto hodnoty neodpovídají katalogovým.

Tab. 3.35: Cirkulátor se SN: A16000037 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,97 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-17,83	0,86		
1	3	-50,00			43,03
2	1	-50,00		43,03	
2	3	-18,53	1,56		
3	1	-50,00		43,03	
3	2	-50,00		43,03	

Tab. 3.36: Cirkulátor se SN: A16000037 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-18,55	11,45		
1	3	-50,00			42,90
2	1	-50,00		42,90	
2	3	-33,95	26,85		
3	1	-35,28	28,18		
3	2	-50,00		42,90	

Naměřené hodnoty pro cirkulátor se sériovým číslem A16001129 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm jsou uvedeny v tab. 3.37. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm jsou hodnoty v tab. 3.38. Pro vlnovou délku 1310 nm nebyl cirkulátor vytvořen, a proto hodnoty neodpovídají katalogovým. Katalogové hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm odpovídají, mírně zvýšený vložný útlum ze druhého portu na třetí port mohl být způsoben druhou optickou spojkou oproti referenčnímu měření.

Tab. 3.37: Cirkulátor se SN: A16001129 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-27,26	20,40		
1	3	-50,00			43,14
2	1	-39,17	32,31		
2	3	-22,94	16,08		
3	1	-50,00		43,14	
3	2	-36,91	30,05		

Tab. 3.38: Cirkulátor se SN: A16001129 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,1 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-7,44	0,34		
1	3	-50,00			42,90
2	1	-50,00		42,90	
2	3	-8,89	1,79		
3	1	-50,00		42,90	
3	2	-50,00		42,90	

Naměřené hodnoty pro cirkulátor se sériovým číslem 90004659 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm jsou uvedeny v tab. 3.39. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm jsou hodnoty v tab. 3.40. Pro obě vlnové délky naměřené hodnoty odpovídají katalogovým.

Tab. 3.39: Cirkulátor se SN: 90004659 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-7,91	0,83		
1	3	-50,00			42,92
2	1	-50,00		42,92	
2	3	-8,47	1,39		
3	1	-50,00		42,92	
3	2	-50,00		42,92	

Tab. 3.40: Cirkulátor se SN: 90004659 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-7,93	0,63		
1	3	-50,00			42,80
2	1	-50,00		42,80	
2	3	-8,69	1,39		
3	1	-50,00		42,80	
3	2	-50,00		42,80	

Naměřené hodnoty pro cirkulátor se sériovým číslem 18040064 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 7,16 dBm jsou uvedeny v tab. 3.41. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm jsou hodnoty v tab. 3.42. Pro vlnovou délku 1310 nm nebyl cirkulátor vytvořen, a proto hodnoty neodpovídají katalogovým. Katalogové hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm odpovídají, mírně zvýšený vložný útlum ze druhého portu na třetí port mohl být způsoben druhou optickou spojkou oproti referenčnímu měření.

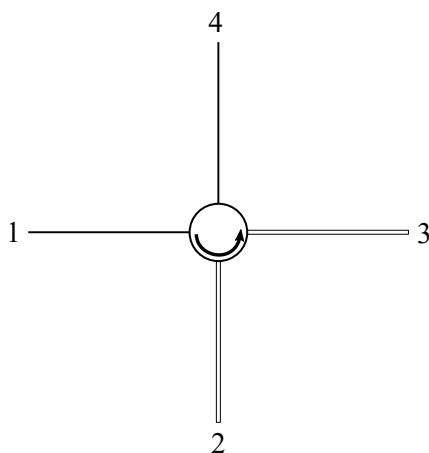
Tab. 3.41: Cirkulátor se SN: 18040064 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 7,16 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-10,87	3,71		
1	3	-50,00			42,84
2	1	-23,70		16,54	
2	3	-21,97	14,81		
3	1	-35,12		27,96	
3	2	-50,00		42,84	

Tab. 3.42: Cirkulátor se SN: 18040064 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-8,44	1,30		
1	3	-50,00			42,86
2	1	-50,00		42,86	
2	3	-8,87	1,73		
3	1	-50,00		42,86	
3	2	-50,00		42,86	

Naměřené hodnoty pro cirkulátor se sériovým číslem 120900180 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,94 dBm jsou uvedeny v tab. 3.43. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm jsou hodnoty v tab. 3.44. Schéma zapojení cirkulátoru se sériovým číslem 120900180 je na obr. 3.6. Pro vlnovou délku 1310 nm nebyl cirkulátor vytvořen, a proto hodnoty neodpovídají katalogovým. Katalogové hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm odpovídají, mírně zvýšený vložný útlum ze třetího portu na čtvrtý port mohl být způsoben druhou optickou spojkou oproti referenčnímu měření.



Obr. 3.6: Schéma zapojení cirkulátoru se SN: 120900180.

Tab. 3.43: Cirkulátor se SN: 120900180 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,94 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-21,46	14,52		
1	3	-50,00		43,06	
1	4	-48,01		41,07	
2	1	-32,34		25,40	
2	3	-22,49	15,55		
2	4	-50,00		43,06	
3	1	-50,00		43,06	
3	2	-35,54		28,60	
3	4	-22,00	15,06		
4	1	41,39		34,45	
4	2	-50,00		43,06	
4	3	-36,16			29,22

Tab. 3.44: Cirkulátor se SN: 120900180 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,3 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]	Přeslech [dB]
1	2	-7,59	0,29		
1	3	-50,00		42,7	
1	4	-50,00		42,7	
2	1	-50,00		42,7	
2	3	-8,30	1,00		
2	4	-50,00		42,7	
3	1	-50,00		42,7	
3	2	-50,00		42,7	
3	4	-10,85	1,55		
4	1	-50,00		42,7	
4	2	-50,00		42,7	
4	3	-50,00			42,7

### 3.1.3 Izolátor

Poslední měřenou optickou součástíkou byl izolátor. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulky. Referenční hodnota útlumu laseru pro vlnovou délku 1310 nm a 1550 nm je uvedena u tabulky s výsledky. Katalogové hodnoty měřeného izolátoru jsou uvedeny v tab. 3.45.

Tab. 3.45: Katalogové hodnoty měřené hodnoty.

Sériové číslo	Pracovní vlnová délka [nm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
16004052	1500 - 1600	$\leq 0,8$	$\geq 30$

Naměřené hodnoty pro izolátor se sériovým číslem 16004052 pro vlnovou délku 1310 nm s referenční hodnotou 6,81 dBm jsou uvedeny v tab. 3.46. Pro vlnovou délku 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm jsou hodnoty v tab. 3.47. Schéma zapojení izolátoru se sériovým číslem 16004052 je na obr. 3.7. Pro vlnovou délku 1310 nm nebyl izolátor vytvořen, a proto hodnoty neodpovídají katalogovým. Katalogové hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm odpovídají.



Obr. 3.7: Schéma zapojení izolátoru se SN: 16004052.

Tab. 3.46: Izolátor se SN: 16004052 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,81 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
Vstup	Výstup	-8,64	1,83	
Výstup	Vstup	-15,35		8,54

Tab. 3.47: Izolátor se SN: 16004052 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
Vstup	Výstup	-7,50	0,52	
Výstup	Vstup	-38,31		31,33

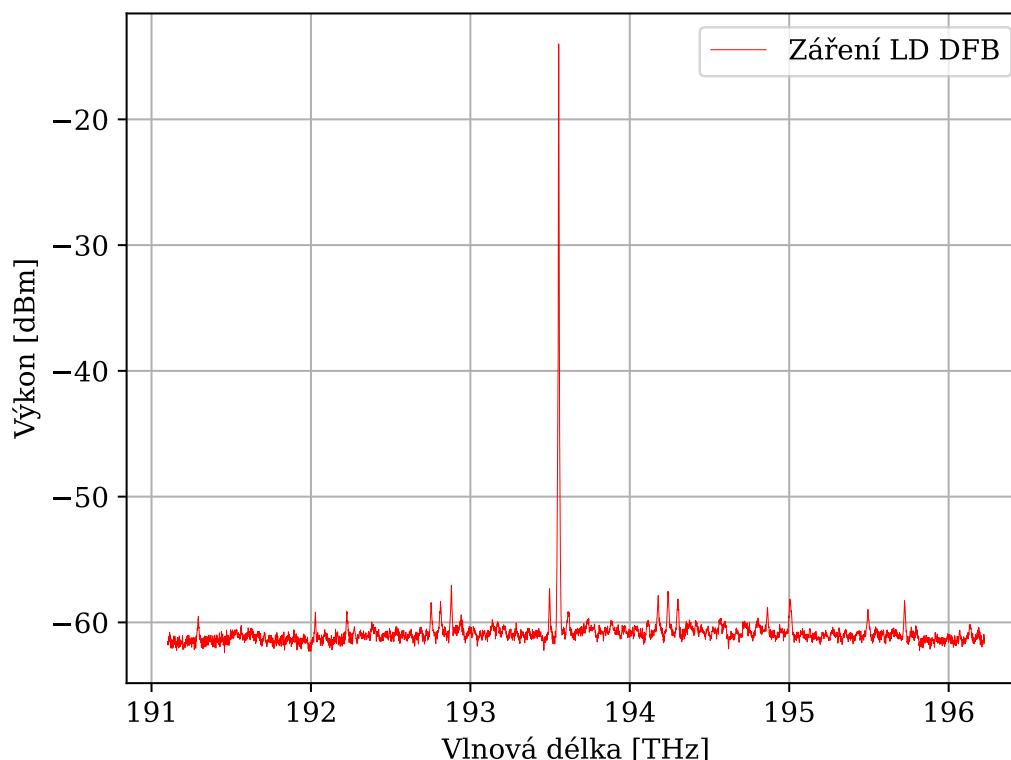


## 3.2 Měření optoelektronických komponent

### 3.2.1 Laserová dioda

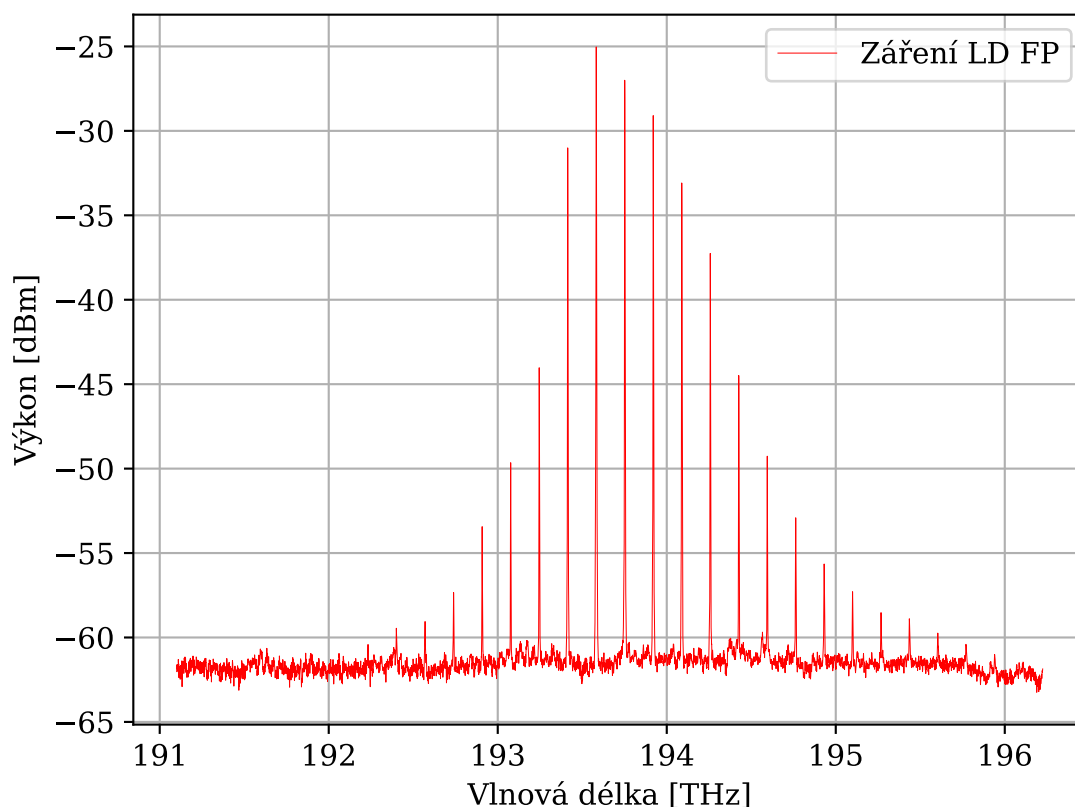
U laserové diody byla nejdříve změřena spektrální charakteristika záření. Měření bylo provedeno pomocí optického analyzátoru od společnosti Finisar typ WaveAnalyzer 100S. Analyzátor byl propojen s počítačem pomocí USB kabelu, na kterém byl nainstalovaný program WaveAnalyzer pro analýzu výstupních dat z analyzátoru. Jako první laserová dioda byla zvolena dioda LD100 od společnosti Koheron. Ta byla propojena s optickým analyzátozem pomocí dvou optických vláken s délkou jeden metr, které byly z jedné strany zakončeny pomocí konektoru FC/APC a z druhé strany SC/APC. Mezi optická vlákna byl zařazen optický útlumový článek 10 dB z důvodu ochrany optického analyzátoru, aby nedošlo k překročení maximálního povoleného vstupního signálu do analyzátoru. Jako druhá laserová dioda byla zvolena laserová dioda FOLS-101 a byla zapojena stejným způsobem. Před samotným měřením byly vždy všechny optické konektory řádně očištěny.

Naměřená spektrální charakteristika DFB laserové diody LD100 je na obr. 3.8.



Obr. 3.8: Spektrální charakteristika DFB LD100.

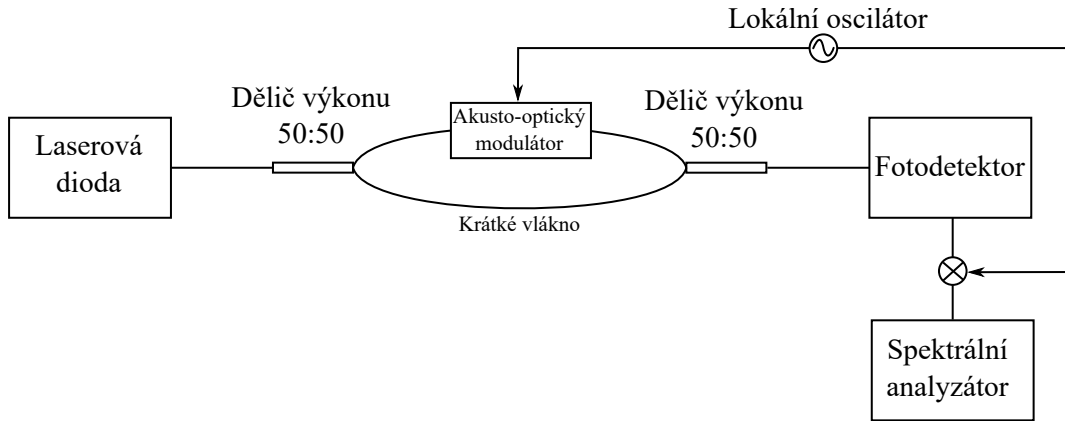
Naměřená spektrální charakteristika FP laserové diody LD100 je na obr. 3.9. Změřená hodnota záření pro LD100 byla 193,55372 THz, po převedení vychází na 1548,885 nm a pro FOLS-101 byla 193,5822 THz, po převedení vychází na 1548,6571 nm. Oba výrobci udávají vlnovou délku 1550 nm a žádnou toleranční odchylku v katalogovém listu neuvádí, často se uvádí odchylka  $\pm 1,5$  nm, pokud o ní budeme uvažovat i u této diody, tak hodnotě z katalogového listu odpovídá.



Obr. 3.9: Spektrální charakteristika FP FOLS-101.

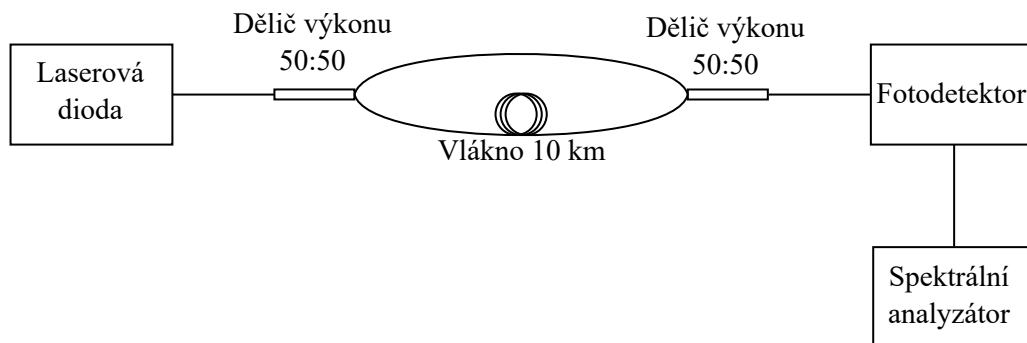
Dále byla změřena spektrální šířka u laserové diody LD100. Pro měření spektrální šířky se mohou využít dvě self-homodyne metody [33]:

**Krátké zpoždění** Paprsek z laserové diody je rozdělen pomocí děliče optického výkonu s poměrem 50:50, jeden výstup z optického děliče je připojen do akusto-optického modulátoru a následně do dalšího optického děliče výkonu s poměrem 50:50. Druhý paprsek z prvního optického děliče výkonu je propojen pomocí propojovacího vlákna s druhým děličem výkonu, kde jsou paprsky sloučeny a přivedeny na fotodetektor. Akusto-optický modulátor je propojen s oscilátorem, který se stará o zpoždění [33]. Zapojení je znázorněno na obr. 3.10.



Obr. 3.10: Zapojení self-homodyne metody pomocí krátkého zpoždění [33].

**Dlouhé zpoždění** Paprsek z laserové diody je rozdělen pomocí děliče optického výkonu s poměrem 50:50, jeden výstup z optického děliče je připojen do dlouhého vlákna a následně do dalšího optického děliče výkonu s poměrem 50:50. Druhý paprsek z prvního optického děliče výkonu je propojen pomocí propojovacího vlákna s druhým děličem výkonu, kde jsou paprsky sloučeny a přivedeny na fotodetektor. V tomto případě se o zpoždění paprsku stará dlouhé vlákno [33]. Zapojení je znázorněno na obr. 3.11.



Obr. 3.11: Zapojení self-homodyne metody pomocí dlouhého zpoždění [33].

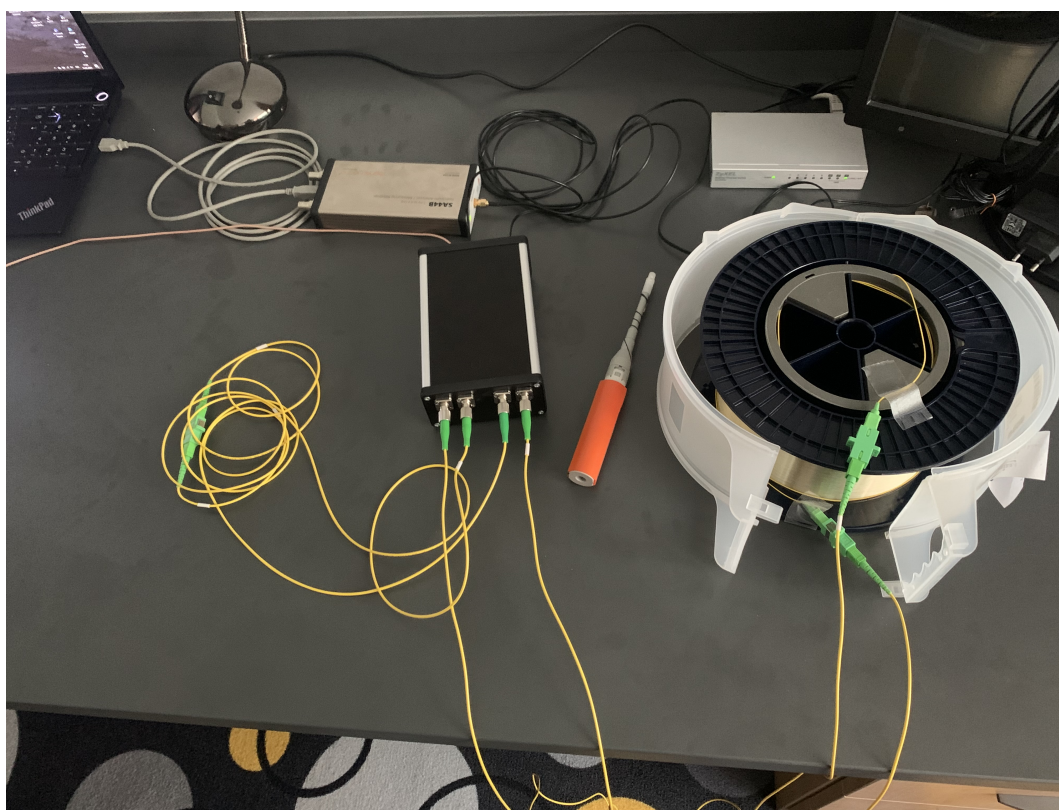
Pro měření byla zvolena metoda dlouhého zpoždění. Zpoždění paprsku se musí dosáhnout z důvodu porušení koherence, a proto byla spočítána minimální délka koherenčního vlákna podle vzorce

$$L_{coh} = \frac{c}{\pi \Delta \nu}, \quad (3.1)$$

kde  $\Delta \nu$  je šířka pásma [37].

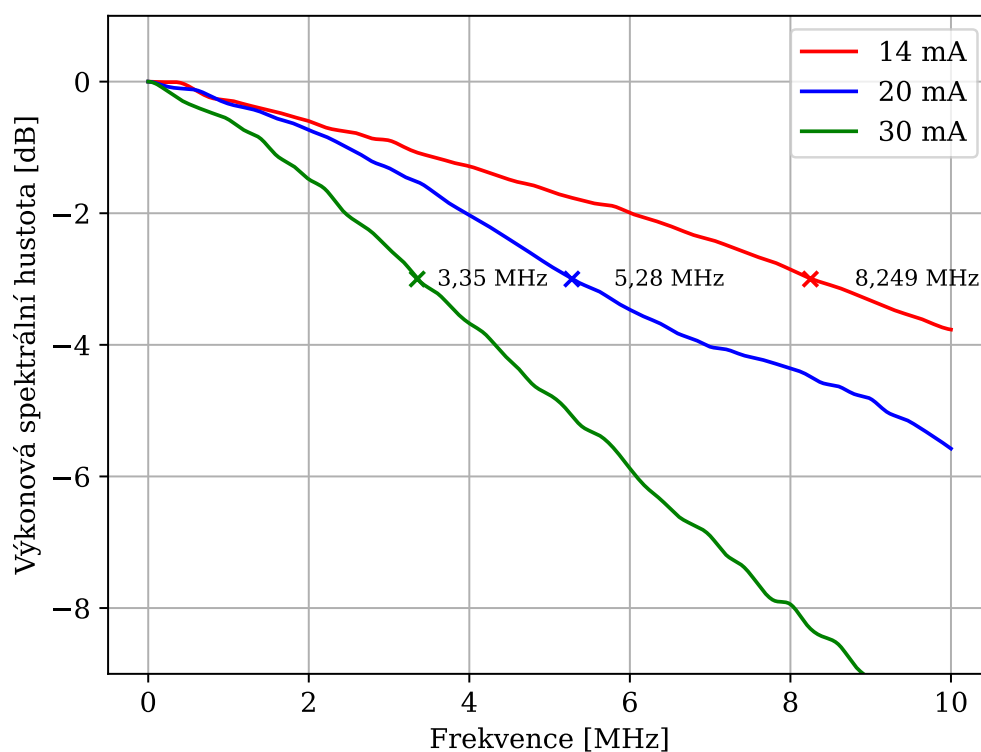
Minimální délka koherenčního vlákna vyšla 19,1 metru. Pro měření byla použita deska LPD100 od společnosti Koheron, která obsahuje laserovou diodu LD100

a fotodetektor PD100. Fotodetektor měl na svém vstupu útlumový článek 5 dB z důvodu ochrany, aby nedošlo k překročení maximálního povoleného vstupního signálu do analyzátoru. Deska byla integrovaná v boxu, který obsahoval dva děliče výkonu 50:50, které byly zakončeny pomocí FC/APC konektorů, kde jeden vstup z prvního děliče výkonu byl připojen na led diodu, druhý vstup byl ponechán volný a opatřen krytkou, dva výstupy byly umístěny na box pomocí spojek pro FC konektory. Druhý dělič výkonu měl jeden výstup umístěn na fotodetektor, druhý výstup nebyl zapojen a byl zakryt. Dva vstupy byly umístěny na box pomocí spojek pro FC konektory. Všechny konektory před měřením byly očištěny pomocí čistícího pera. První výstup z prvního děliče výkonu byl připojen přímo na první vstup druhého děliče výkonu pomocí propojovacích vláken s délkou jeden metr zakončených FC/APC konektorem a z druhé strany SC/APC konektorem. Strany s SC/APC konektory byly spojeny pomocí optické spojky. Druhý výstup prvního děliče výkonu byl propojen do 10 km dlouhého vlákna, které bylo zakončeno pomocí SC/APC konektorů. Propojení bylo provedeno pomocí propojovacích vláken s délkou jeden metr zakončených FC/APC konektorem a z druhé strany SC/APC konektorem. Konektory SC/APC byly propojeny pomocí optické spojky. Druhá strana 10 km dlouhého vlákna byla stejným způsobem propojena s druhým vstupním portem druhého optického děliče, jak je znázorněno na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Reálné zapojení self-homodyne metody pomocí dlouhého vlákna.

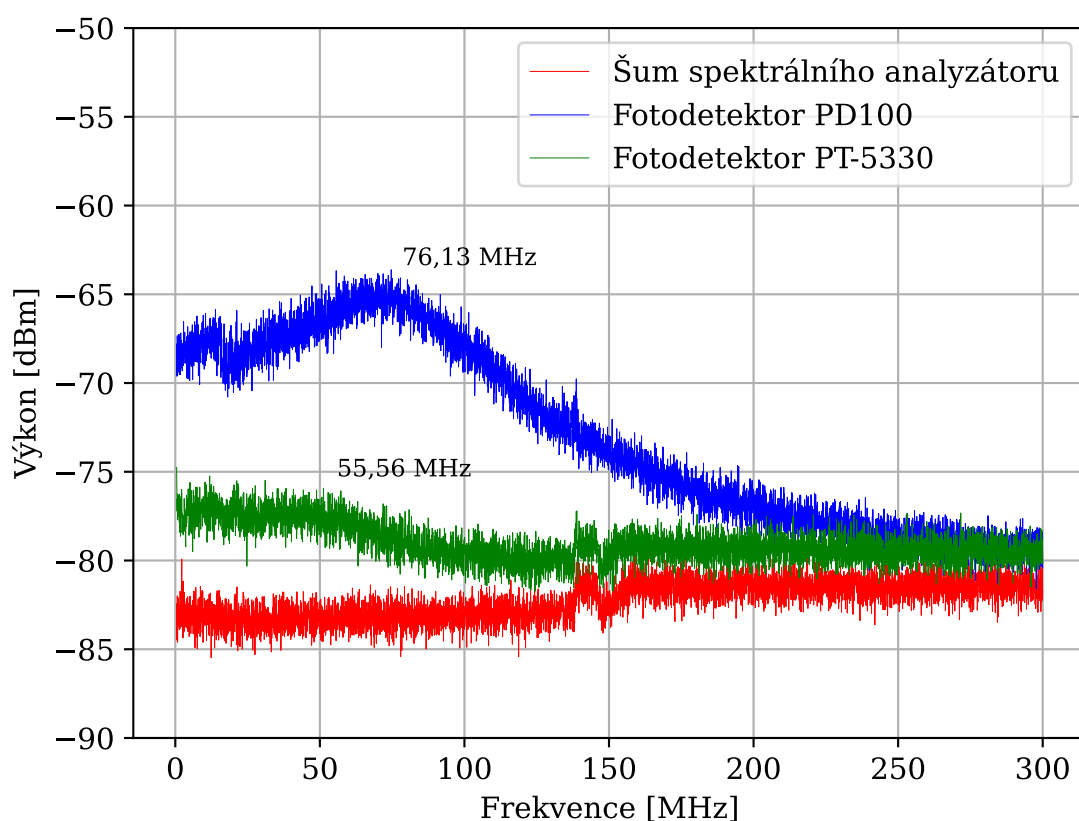
Měření probíhalo pomocí spektrálního analyzátoru SA44B od společnosti Signal Hound, který byl propojen pomocí 50  $\Omega$  třímetrového koaxiálního kabelu, který byl zakončen SMA konektory a byl zapojen do výstupu fotodetektoru. Analyzátor byl propojen pomocí USB kabelu s počítačem, na kterém byl nainstalovaný program Spike pro analýzu výstupních dat z analyzátoru. Pomocí spektrálního analyzátoru bylo nasbíráno 1000 hodnot pro každou nastavenou hodnotu proudu, které byly následně zprůměrovány a vykresleny do grafu. Ten je znázorněn na obr. 3.13. Laserová dioda má v katalogu uvedenou spektrální šířku 3 MHz až 8 MHz. Měření probíhalo pro nastavení výstupního proudu LD diodu na 14 mA, 20 mA a 30 mA. Naměřená hodnota spektrální šířky pro 20 mA byla 5,28 MHz a 30 mA byla 3,35 MHz a odpovídají katalogovým hodnotám. Naměřená spektrální šířka pro 14 mA byla 8,249 MHz a překročila svojí maximální katalogovou hodnotu. To mohla způsobit její nižší nastavená hodnota proudu. Mezní hodnota byla změřena na 6,2 mA.



Obr. 3.13: Spektrální šířka LD100 pro 14 mA, 20 mA a 30 mA.

### 3.2.2 Fotodetektor

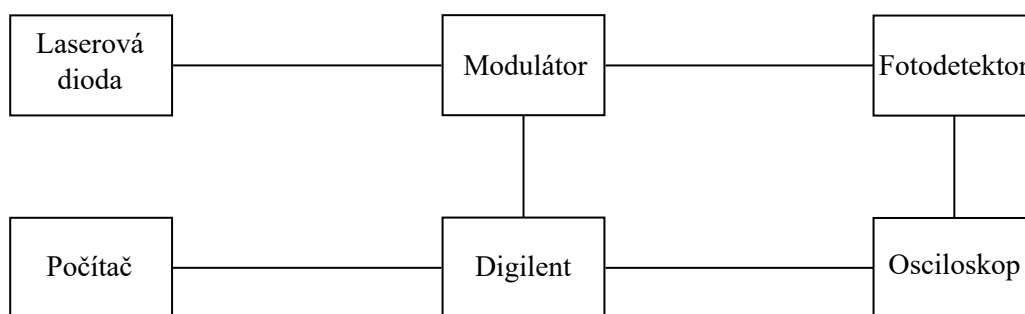
U fotodetektoru byla změřena jeho frekvenční charakteristika. K tomuto měření byly použity fotodetektory PD100 a PT-5330. Dále byl použit spektrální analyzátor SA44B. Nejdříve byl změřen šum spektrálního analyzátoru. Následně byl zakryt vstup fotodetektoru a zapnuto jeho napájení. Poté byla změřena frekvenční charakteristika fotodetektorů PD100 a PT-5330. Fotodetektory byly propojeny s analyzátozem pomocí  $50\ \Omega$  třímetrového koaxiálního kabelu, jak je znázorněno na obr. 3.14, kde je také uvedena jejich mezní frekvence. Mezní frekvence pro fotodetektor PD100 je 76,13 MHz, tato hodnota podle stránek výrobce je v pořádku. Pro fotodetektor PT-5330 byla naměřena mezní frekvence 55,56 MHz. Na stránkách výrobce nebyla nalezena žádná vhodná hodnota pro vyhodnocení naměřených hodnot.



Obr. 3.14: Frekvenční charakteristika PD100 a PT-5330.

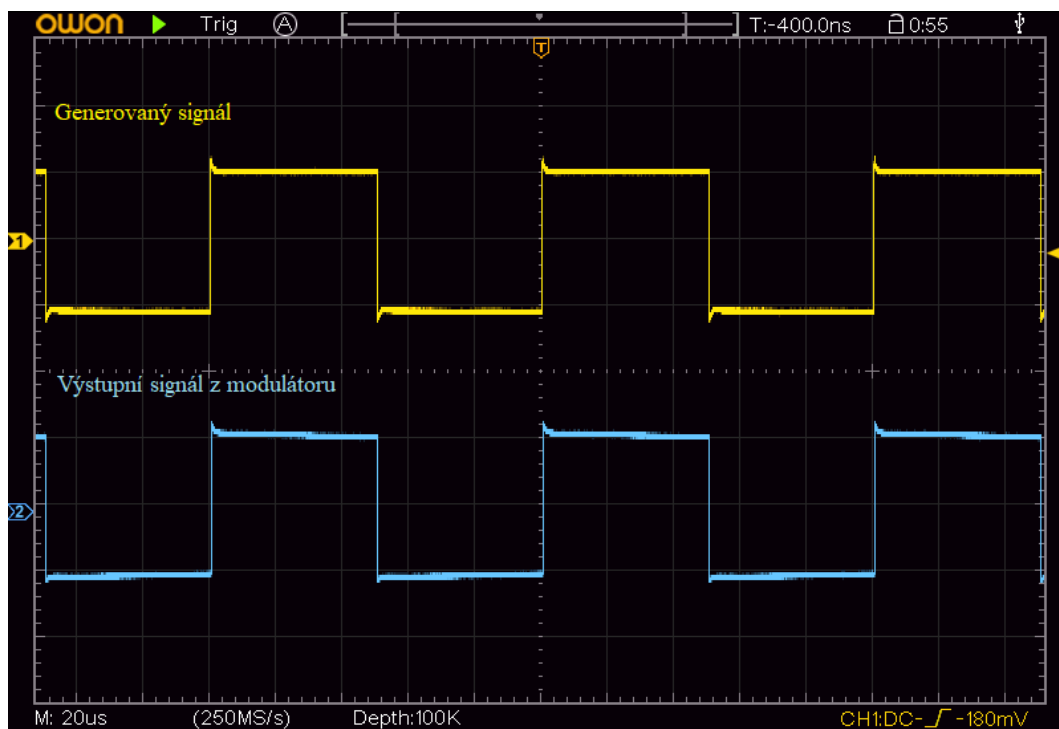
### 3.2.3 Modulátor

U modulátoru byly ověřeny jeho modulační vlastnosti a porovnání vstupního signálu do modulátoru a signálu přijímaného pomocí fotodetektoru. Pro měření byla použita deska LPD100, u které předchozím měřením byla ověřena její funkčnost. Dále byl použit modulátor JDSU X5t a pro vytváření signálu byl použit přípravek Digilent analog discovery 2. Ten za použití aplikace WaveForms umí mimo jiné vytvářet analogový signál. Pomocí osciloskopu Owon XDS3104E byl zachycen generovaný signál z přípravku Digilent a zároveň modulový signál z osciloskopu. Laserová dioda byla propojena s modulátorem pomocí optického vlákna s délkou jeden metr, které bylo z jedné strany zakončeno pomocí konektorů FC/APC a z druhé strany FC/UPC a optické spojky na FC konektory. Konektor FC/APC byl zapojen do laserové diody a konektor FC/UPC pomocí spojky na optický vstup modulátoru. Fotodetektor s modulátorem byly propojeny pomocí optického vlákna s délkou jeden metr, které bylo z jedné strany zakončeno pomocí konektorů FC/APC a z druhé strany LC/UPC a optické spojky na LC konektory. Konektor FC/APC byl zapojen do fotodetektoru diody a konektor FC/UPC pomocí spojky na optický výstup modulátoru. Osciloskop byl propojen s fotodetektorem pomocí 50  $\Omega$  kabelu, který byl na jedné straně osazen konektorem SMA a byl připojen na výstup fotodiody LD100, druhý konec měl očištěné kontakty od izolace a pomocí měřící sondy byl připojen na druhý vstup osciloskopu. Součástí přípravku Digilent byla rozšiřující deska Discovery BNC, jejím účelem je převod kontaktů z přípravku na BNC konektory. Pomocí BNC konektoru W1 byl přípravek propojen s modulátorem za použití metrového 50  $\Omega$  koaxiálního kabelu, který byl zakončen SMA konektorem a ten byl zapojen do modulátoru na port označený RF. Výstupní nožičky na BNC konektor na portu W1 byly připojeny na měřící sondu, která byla připojena na první vstup osciloskopu. Digilent s počítačem byl propojen pomocí USB kabelu. Propojení je znázorněno na obr. 3.15.



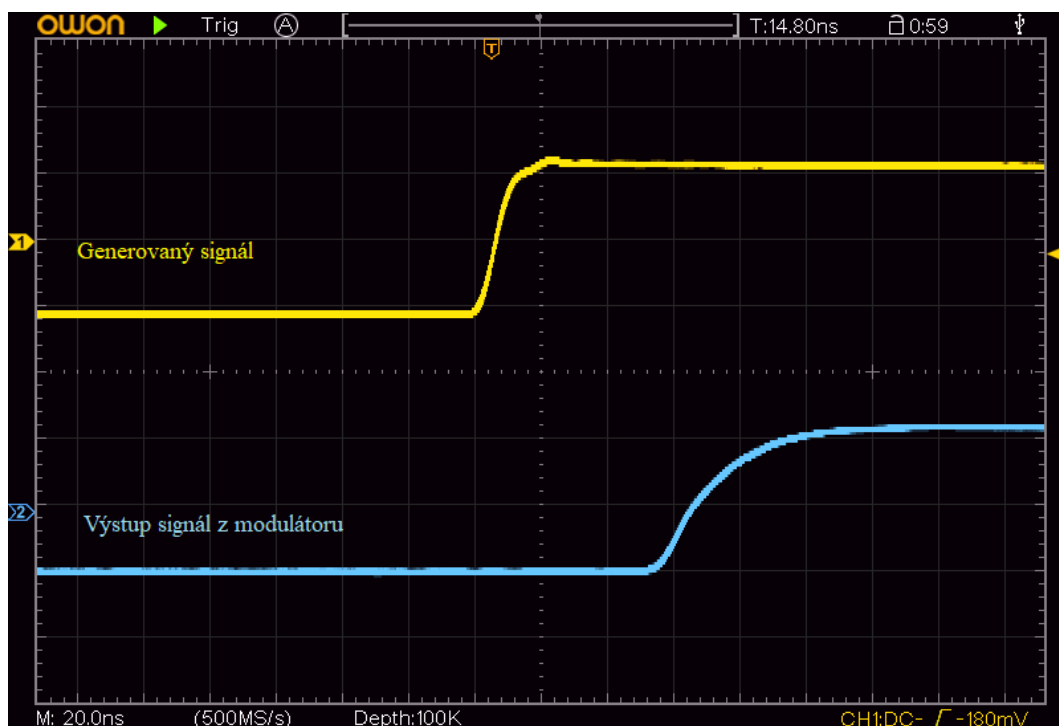
Obr. 3.15: Znázornění zapojení modulátoru.

Před měřením byly všechny konektory řádně očištěny pomocí čistícího pera a měřicí sondy na osciloskopu byly zkalibrovány. Pomocí aplikace WaveFormrms byl vytvořen symetrický čtvercový signál s frekvencí 10 kHz v rozpětí 0 V až 5 V. Vertikální rozlišení bylo 2 V na článek a horizontální bylo 20  $\mu s$  na článek. Porovnání vstupního signálu a modulovaného signálu zachyceného pomocí fotodetektoru je znázorněno na obr. 3.16, kde signál z přípravku Digilent je znázorněn žlutě a signál z fotodetektoru je znázorněn modře. Dále bylo změřeno zkosení náběžné hrany, které je znázorněno na obr. 3.17, která u výstupního signálu z Digilentu bylo 16 ns a je znázorněna žlutě. U signálu z fotodetektoru bylo 52 ns a je znázorněn modře. Posun vstupního a výstupního signálu byl 77 ns. Toto zpoždění ale nebylo způsobeno modulátorem, ale bylo změřeno i přímo vysíláním signálu z laserové diody na desce PLD100.



Obr. 3.16: Porovnání vstupního signálu do modulátoru a výstupního signálu z fotodetektoru.





Obr. 3.17: Porovnání náběžných hran vstupního signálu do modulátoru a výstupního signálu z fotodetektoru.

# Závěr

Cílem práce byl teoretický rozbor optických a optoelektronických komponent, jako jsou dělič výkonu, cirkulátor, izolátor, laserová dioda, fotodetektor a modulátor. U jednotlivých komponent byly definovány jejich základní parametry včetně jejich vysvětlení. V praktické části práce byl proveden návrh měření parametrů jednotlivých komponent. Následně je provedeno měření třinácti děličů výkonu, pěti cirkulátorů a jednoho izolátoru. Dále bylo provedeno měření dvou laserových diod, dvou fotodetektorů a jednoho modulátoru.

První část práce se věnovala problematice optických tras. Tato část se zaměřuje na optické kabely a měřící metody. V části o optických kabelových trasách jsou popsány jednovláknová a mnohavláknová vlákna, je zde popsán postup navázání paprsku do vlákna. Měřící metody jsou rozděleny na metodu dvou délek, vložných ztrát a zpětného rozptylu. Druhá část popisuje optické a optoelektronické komponenty, jako jsou dělič výkonu, izolátor a cirkulátor a jsou zde uvedeny jejich druhy a sledované parametry. Také se zabývá popisem laserové diody, fotodetektoru a modulátoru včetně jejich druhů a sledových parametrů.

V poslední části práce je zprovozněno testovací prostředí vybraných optických a optoelektronických komponent. U děliče výkonu je změřen dělicí poměr, vložný útlum a izolační schopnosti. U cirkulátoru je změřen vložný útlum, přeslech a izolační schopnosti a u izolátoru je změřen vložný útlum a izolační schopnosti. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulek a porovnány s katalogovými hodnotami. U laserových diod je změřena spektrální charakteristika záření a spektrální šířka pásma, u fotodetektorů je změřena frekvenční charakteristika a u modulátoru jsou ověřeny jeho modulační schopnosti a zkosení hran u modulovaného signálu. Naměřené hodnoty jsou porovnány s katalogovými hodnotami.

Celkem bylo změřeno třináct děličů výkonu, pět cirkulátorů a jeden izolátor. Devět děličů výkonu bylo v poměru 50:50 a pokud byly použity pro svoji pracovní vlnovou délku, byl jejich vložný útlum i dělicí poměr v pořádku, kromě děliče výkonu se sériovým číslem 72658887, který měl zvýšený vložný útlum při použití třetího portu, tím byl špatný i dělicí poměr při jeho použití. To mohlo být způsobeno například jeho poškozením. Dále byl jeden dělič výkonu v poměru 60:40, dva 90:10 a jeden v poměru 99:1. Pokud byly použity pro svoji pracovní vlnovou délku, byl jejich vložný útlum i dělicí poměr v pořádku. Čtyři cirkulátory byly se třemi porty a jeden měl porty čtyři, také bylo vyhodnoceno, že jejich naměřené hodnoty odpovídají katalogovým hodnotám. Poslední optickou komponentou byl izolátor, u kterého naměřené hodnoty také odpovídaly.

U laserových diod byla změřena jejich spektrální charakteristika záření. U laserové diody LD100 byla změřena hodnota 1548,885 nm a u FOLS-101 1548,657 nm.

U obou je schodně v katalogu uvedena hodnota 1550 nm bez tolerance, ale běžně se uvádí běžná odchylka 1,5 nm. Pokud o ní budeme uvažovat, tak obě laserové diody odpovídají. Následně u laserové diody LD100 byla změřena její spektrální šířka 14 mA, 20 mA a 30 mA za pomoci self-homodyne metody pomocí dlouhého vlákna. Pro 30 mA byla změřena hodnota 3,35 MHz, pro 20 mA hodnota 5,28 MHz a pro 14 mA hodnota 8,249 MHz. Katalogové hodnoty uvádí rozpětí 3 MHz až 8 MHz. Překročení hranice pro 14 mA mohla být způsobena nastavením nízké hodnoty proudu. Mezní hodnota byla změřena na 6,2 mA. U fotodetektorů byla změřena jejich frekvenční charakteristika a určena jejich mezní frekvence. U fotodetektoru PD100 byla určena hodnota 76,133 MHz, která je podle hodnot výrobce vyhovující. U PT-5330 byla změřena hodnota 55,56 MHz, ale v katalogovém listu výrobce nebyla hodnota pro ověření nalezena. U modulátoru JDSU X5t bylo porovnáno zkosení náběžné hrany signálu z generátoru, které bylo 16 ns a signál po modulátoru snímaný fotodetektorem na desce LPD100. V tomto případě byla naměřena hodnota 52 ns. Při kontrole zkosení náběžných hran bylo zjištěno zpoždění 77 ns. Toto zpoždění nebylo způsobeno modulátorem, ale bylo ověřeno, že se nachází i na přímém zapojení laserové diody na fotodetektor.

# Literatura

- [1] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/03.html>
- [2] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/05.html>
- [3] SENIOR, John M. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0130326812.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky: Optoelektronika - optoelektronické prvky a optická vlákna*. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0184-5.
- [5] FILKA, Miloslav. *Optické sítě*. Brno: Skripta VUT FEKT, 2007.
- [6] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ. *Měření útlumu trasy* [online]. 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/838>
- [7] K. DUTTA, Achyut, Niloy K. DUTTA a Masahiko FUJIWARA. *WDM technologies: passive optical components*. 1. Amsterdam: Academic Press, c2003. ISBN 01-222-5262-4.
- [8] *Optical Fiber Couplers* [online]. California: FOSCO., 2010 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95047750-optical-fiber-couplers>
- [9] RAMASWAMI, Rajiv, Kumar N. SIVARAJAN a Galen H. SASAKI. *Optical Networks (Third Edition)*. 3. Boston: Morgan Kaufmann, 2010. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [10] VARGHESE K, Samuel. *Fabrication and Characterization of All-Fiber Components for Optical Access Networks* [online]. Cochin University of Science and Technology, 2008 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/1917/Dyuthi-T0408.pdf?sequence=18>. Ph. D Thesis. Cochin University of Science and Technology. Vedoucí práce N Nampoori.
- [11] *How Do Different Fiber Optic Couplers Work?* [online]. Neufahrn bei Munich: FS community, 2014 [cit. 2021-04-07]. Dostupné

- z: <https://community.fs.com/blog/how-do-different-fiber-optic-couplers-work.html>
- [12] TENGLER, Libor a kolektiv. *Příručka pro projektování a návrh NGA sítí*. Praha: OFA, 2015.
- [13] IGA, Kenichi a Edgar Y. CHOUEIRI. Microoptics. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. Elsevier, 2003, 735-754 [cit. 2021-04-07]. ISBN 9780122274107. Dostupné z: doi:10.1016/B0-12-227410-5/00441-5
- [14] *Optical Isolator Tutorial* [online]. New Jersey: Thorlabs [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=7299](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7299)
- [15] *Faraday Effect* [online]. California: FOSCO., 2016 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/99205446-faraday-effect>
- [16] *Thorlabs Lab Fact: Isolation & Transmission Properties of IO-F and IO-H Fiber Isolators* [online]. New Jersey: Thorlabs [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=9018](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9018)
- [17] *Fiber Optic Circulators* [online]. New Jersey: Thorlabs [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide\\_id=2239](https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2239)
- [18] *Getting to Know Optical Circulator* [online]. Fiber Optical Networking, 2016 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <http://www.fiber-optical-networking.com/getting-know-optical-circulator.html>
- [19] CZARSKE, Jurgen, Shulian ZHANG, David SAMPSON, et al. *Detection of optical circulator crosstalk based on signal modulation* [online]. 2014-12-3 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2075188
- [20] *WDM technologies: active optical components*. 1. Amsterdam: Academic Press, c2002. ISBN 01-222-5261-6.
- [21] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody: Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, **2001**(34) [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [22] LUKÁŠ, Michal. LASEROVÉ DIODY 3: Parametry laserových diod a jejich měření. *Elektrorevue* [online]. 2002, **2002**(23) [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>

- [23] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody 2: Typy a struktury laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, **2001**(43) [cit. 2021-04-07].  
Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [24] HO, Keang-Po. *Advanced Topics in Lightwave Communications* Generation of Optical Signals [online]. 2005, , 21 [cit. 2021-04-07].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/239374959\\_Advanced\\_Topics\\_in\\_Lightwave\\_Communications\\_Generation\\_of\\_Optical\\_Signals/download](https://www.researchgate.net/publication/239374959_Advanced_Topics_in_Lightwave_Communications_Generation_of_Optical_Signals/download)
- [25] KREJČÍ, Robert a Eduard HULICIUS. Polovodičové lasery a LED-ky. *Microdesignum: Parametry, aplikace, srovnání* [online]. 2007 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [26] BELAS, E. a P. MORAVEC. *1 Polovodičové detektory a záření* [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-04-07].  
Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/files/courses/Belasdetekce.pdf>.  
Univerzita Karlova.
- [27] BAŘINA, Jaromír, Pavel BRINDL, Ivo VLK, et al. Fotodioda. *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/611>
- [28] JOHNSON, Mark. *Photodetection and measurement: Maximizing performance in optical systems*. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 00-714-0944-0.
- [29] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-858-6300-6.
- [30] PASCHOTTA, Rüdiger. Photodetectors *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/photodetectors.html>
- [31] MACKOWIAK, Verena, Jens PEUPELMANN, Yi MA a Anthony GORGES. NEP — Noise Equivalent Power. *Thorlabs* [online]. , 5 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Noise\\_Equivalent\\_Power\\_White\\_Paper.pdf](https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Noise_Equivalent_Power_White_Paper.pdf)
- [32] BASS, Michael. *Handbook of optics* [online]. 2. nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995 [cit. 2021-04-07]. ISBN 0-07-047974-7. Dostupné z: <http://www-personal.umich.edu/~andrewcb/DSO/Books/Handbook%20of%20optics%20Vol.IV.pdf>

- [33] PASCHOTTA, Rüdiger. Electro-optic Modulators. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/electro\\_optic\\_modulators.html](https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html)
- [34] SALEH, Bahaa E. A. *Fundamentals of photonics*. New York: Wiley, [1991]. Wiley series in pure and applied optics. ISBN 04-718-3965-5.
- [35] PASCHOTTA, Rüdiger. *Acousto-optic Modulators* [online]. Electro-optic Modulators [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/electro\\_optic\\_modulators.html](https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html)
- [36] *Laser linewidth measurement* [online]. Koheron, 2017 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.koheron.com/blog/2017/01/05/laser-linewidth-measurement>
- [37] PASCHOTTA, Rüdiger. *Coherence Length* [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/coherence\\_length.html](https://www.rp-photonics.com/coherence_length.html)

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>APC</b>	Angled physical contact
<b>APD</b>	Avalanche Photodiode
<b>BNC</b>	Bayonet Naur Connector
<b>cos</b>	cosinus
<b>dB</b>	Decibel
<b>dBm</b>	Decibel on milliwatt
<b>DFB</b>	Distributed feedback laser
<b>DWDM</b>	Dense wavelength division multiplexing
<b>EEL</b>	Edge emitting lasers
<b>FC</b>	Ferrule connector
<b>FP</b>	Fabry – Perot
<b>GaAs</b>	arsenid gallia
<b>GalAs</b>	Aluminium gallium arsenid
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>InGaAs</b>	Indium gallium arsenide
<b>LC</b>	Lucent connector
<b>LED</b>	Light emitting diode
<b>m</b>	metr
<b>mA</b>	miliampér
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>ms</b>	milisekunda
<b>mW</b>	miliwatt
$\mu m$	mikrometr
<b>UPC</b>	Ultra physical contact



<b>NIR</b>	nanometr infra red
<b>nm</b>	nanometr
<b>SC</b>	Subscriber connector
<b>SMA</b>	Sub-miniature a connector
<b>VCSEL</b>	Vertical cavity surface emitting lasers
<b>SWIR</b>	short wave infra red
<b>THz</b>	Terahertz
<b>WDM</b>	Wavelength division multiplex

## A Naměřené hodnoty u děličů výkonu

Tab. A.1: Dělič výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,27	3,36	
1	3	-10,25	3,34	
1	4	-50,00		43,09
2	1	-10,14	3,23	
2	3	-50,00		43,09
2	4	-10,31	3,40	
3	1	-10,04	3,13	
3	2	-50,00		43,09
3	4	-10,08	3,18	
4	1	-50,00		43,09
4	2	-10,45	3,54	
4	3	-10,27	3,36	

Tab. A.2: Dělič výkonu se SN: 72658742 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,14 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,14	3,00	
1	3	-10,32	3,18	
1	4	-50,00		42,86
2	1	-10,12	2,98	
2	3	-50,00		42,86
2	4	-10,25	3,11	
3	1	-10,38	3,25	
3	2	-50,00		42,86
3	4	-10,23	3,09	
4	1	-50,00		42,86
4	2	-10,65	3,51	
4	3	-10,61	3,47	

Tab. A.3: Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,72 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,94	4,22	
1	3	-11,96	5,25	
1	4	-50,00		43,28
2	1	-11,63	4,61	
2	3	-50,00		43,28
2	4	-12,68	5,70	
3	1	-12,75	5,77	
3	2	-50,00		43,28
3	4	-12,44	5,46	
4	1	-50,00		43,28
4	2	-11,52	4,54	
4	3	-11,76	4,78	

Tab. A.4: Dělič výkonu se SN: 72658887 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,03 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,49	3,46	
1	3	-11,54	4,51	
1	4	-50,00		42,97
2	1	-10,00	2,97	
2	3	-50,00		42,97
2	4	-10,13	3,10	
3	1	-11,25	4,22	
3	2	-50,00		42,97
3	4	-10,99	3,95	
4	1	-50,00		42,97
4	2	-10,65	3,62	
4	3	-11,46	4,43	

Tab. A.5: Dělič výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-15,18	8,36	
1	3	-10,37	3,55	
1	4	-50,00		43,18
2	1	-13,92	7,11	
2	3	-50,00		43,18
2	4	-11,60	4,78	
3	1	-9,72	2,91	
3	2	-50,00		43,18
3	4	-12,30	5,48	
4	1	-50,00		43,18
4	2	-9,11	2,29	
4	3	-12,03	5,21	

Tab. A.6: Dělič výkonu se SN: 72658029 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,00 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-14,09	7,09	
1	3	-12,00	4,99	
1	4	-50,00		43,00
2	1	-13,57	6,51	
2	3	-50,00		43,00
2	4	-11,87	4,87	
3	1	-12,30	5,30	
3	2	-50,00		43,00
3	4	-10,59	3,48	
4	1	-50,00		43,00
4	2	-12,25	5,25	
4	3	-10,32	3,32	

Tab. A.7: Dělič výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,77 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,25	3,48	
1	3	-10,29	3,52	
1	4	-50,00		43,23
2	1	-10,44	3,66	
2	3	-50,00		43,23
2	4	-10,65	3,88	
3	1	-10,00	3,22	
3	2	-50,00		43,23
3	4	-10,06	3,28	
4	1	-50,00		43,23
4	2	-10,47	3,70	
4	3	-10,34	3,56	

Tab. A.8: Dělič výkonu se SN: 72658855 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,91 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,66	3,75	
1	3	-10,72	3,81	
1	4	-50,00		43,09
2	1	-10,69	3,78	
2	3	-50,00		43,09
2	4	-10,68	3,77	
3	1	-10,26	3,35	
3	2	-50,00		43,09
3	4	-10,07	3,16	
4	1	-50,00		43,09
4	2	-10,37	3,46	
4	3	-10,27	3,36	

Tab. A.9: Dělič výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-10,52	3,66	
1	3	-11,20	4,34	
1	4	-50,00		43,14
2	1	-9,70	2,84	
2	3	-50,00		43,14
2	4	-11,79	4,93	
3	1	-11,16	4,30	
3	2	-50,00		43,14
3	4	-10,81	3,95	
4	1	-50,00		43,14
4	2	-11,36	4,50	
4	3	-9,78	2,92	

Tab. A.10: Dělič výkonu se SN: 72658807 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,98 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-9,76	2,78	
1	3	-9,68	2,70	
1	4	-50,00		43,02
2	1	-9,82	2,84	
2	3	-50,00		43,02
2	4	-9,95	2,96	
3	1	-9,69	2,61	
3	2	-50,00		43,02
3	4	-9,79	2,81	
4	1	-50,00		43,02
4	2	-9,90	2,92	
4	3	-9,89	2,91	

Tab. A.11: Dělič výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,74 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,26
1	3	-18,51	11,77	
1	4	-7,37	0,63	
2	1	-50,00		43,26
2	3	-7,42	0,69	
2	4	-28,04	11,31	
3	1	-18,61	11,87	
3	2	-7,69	0,95	
3	4	-50,00		43,26
4	1	-7,56	0,80	
4	2	-18,32	11,59	
4	3	-50,00		43,26

Tab. A.12: Dělič výkonu se SN: A150210665 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,87 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,13
1	3	-16,97	10,10	
1	4	-7,02	0,16	
2	1	-50,00		43,13
2	3	-6,92	0,06	
2	4	-16,61	9,75	
3	1	-17,27	10,57	
3	2	-7,22	0,20	
3	4	-50,00		43,13
4	1	-7	0,13	
4	2	-6,50	9,79	
4	3	-50,00		43,13

Tab. A.13: Dělič výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,80 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,20
1	3	-10,90	4,10	
1	4	-9,95	3,16	
2	1	-50,00		43,20
2	3	-9,38	2,59	
2	4	-11,18	4,38	
3	1	-11,23	4,43	
3	2	-9,84	3,04	
3	4	-50,00		43,20
4	1	-9,53	2,74	
4	2	-10,89	4,09	
4	3	-50,00		43,20

Tab. A.14: Dělič výkonu se SN: A160056545 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,12
1	3	-10,21	3,33	
1	4	-10,28	3,40	
2	1	-50,00		43,12
2	3	-10,17	3,30	
2	4	-10,25	3,37	
3	1	-10,33	3,46	
3	2	-10,11	3,26	
3	4	-50,00		43,12
4	1	-10,19	3,32	
4	2	-10,25	3,38	
4	3	-50,00		43,12



Tab. A.15: Dělič výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,17
1	3	-9,36	2,53	
1	4	-10,84	4,08	
2	1	-50,00		43,17
2	3	-10,87	4,11	
2	4	-9,53	2,77	
3	1	-9,94	3,18	
3	2	-10,97	4,21	
3	4	-50,00		43,17
4	1	-11,60	4,84	
4	2	-9,36	2,66	
4	3	-50,00		43,17

Tab. A.16: Dělič výkonu se SN: A160056553 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,93 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,07
1	3	-10,04	3,11	
1	4	-10,16	3,20	
2	1	-50,00		43,07
2	3	-10,17	3,21	
2	4	-10,02	3,06	
3	1	-10,31	3,34	
3	2	-10,22	2,25	
3	4	-50,00		43,07
4	1	-10,19	3,23	
4	2	-10,06	3,10	
4	3	-50,00		43,07

Tab. A.17: Dělič výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,79 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,21
1	3	-8,5	1,71	
1	4	-18,08	11,29	
2	1	-50,00		43,21
2	3	-18,00	11,21	
2	4	-8,16	1,38	
3	1	-8,06	1,27	
3	2	-17,5	10,71	
3	4	-50,00		43,21
4	1	-18,04	11,25	
4	2	-8,21	1,42	
4	3	-50,00		43,21

Tab. A.18: Dělič výkonu se SN: A140062957 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,2 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložný útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		42,8
1	3	-8,74	1,54	
1	4	-18,08	10,88	
2	1	-50,00		42,8
2	3	-18,22	11,01	
2	4	-8,93	1,73	
3	1	-8,82	1,62	
3	2	-18,32	11,11	
3	4	-50,00		42,8
4	1	-19,10	11,90	
4	2	-9,05	1,85	
4	3	-50,00		42,8

Tab. A.19: Dělič výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,83 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,17
1	3	-46,08	39,25	
1	4	-18,22	11,39	
2	1	-50,00		43,17
2	3	-18,06	11,23	
2	4	-46,08	39,25	
3	1	-48,01	41,18	
3	2	-19,76	12,93	
3	4	-50,00		43,17
4	1	-19,34	12,51	
4	2	-48,01	41,18	
4	3	-50,00		43,17

Tab. A.20: Dělič výkonu se SN: A150210657 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,01 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		42,99
1	3	-28,11	21,10	
1	4	-7,56	0,56	
2	1	-50,00		42,99
2	3	-7,98	0,96	
2	4	-28,75	21,74	
3	1	-29,14	22,13	
3	2	-8,74	1,73	
3	4	-50,00		42,99
4	1	-8,75	1,75	
4	2	-29,45	22,44	
4	3	-50,00		42,99

Tab. A.21: Dělič výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,86 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,14
1	3	-21,25	14,39	
1	4	-22,45	15,59	
2	1	-50,00		43,14
2	3	-22,80	15,94	
2	4	-20,75	13,89	
3	1	-21,01	14,17	
3	2	-22,71	15,85	
3	4	-50,00		43,14
4	1	-22,90	16,04	
4	2	-21,53	16,04	
4	3	-50,00		43,14

Tab. A.22: Dělič výkonu se SN: A160022688 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 6,82 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,18
1	3	-10,31	3,49	
1	4	-10,42	3,37	
2	1	-50,00		43,18
2	3	-10,91	3,97	
2	4	-10,88	3,94	
3	1	-10,89	3,95	
3	2	-10,83	3,89	
3	4	-50,00		43,18
4	1	-10,35	3,41	
4	2	-10,36	3,42	
4	3	-50,00		43,18

Tab. A.23: Dělič výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,85 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		43,15
1	3	-9,74	2,89	
1	4	-12,55	5,70	
2	1	-50,00		43,15
2	3	-11,86	5,01	
2	4	-9,65	2,80	
3	1	-12,23	5,38	
3	2	-9,63	2,77	
3	4	-50,00		43,15
4	1	-12,28	5,43	
4	2	-9,95	3,10	
4	3	-50,00		43,15

Tab. A.24: Dělič výkonu se SN: A160056586 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
1	2	-50,00		42,92
1	3	-10,76	3,68	
1	4	-10,60	3,52	
2	1	-50,00		42,92
2	3	-10,68	3,60	
2	4	-10,80	3,72	
3	1	-10,98	3,90	
3	2	-11,08	3,99	
3	4	-50,00		42,92
4	1	-11,15	4,07	
4	2	-11,05	3,97	
4	3	-50,00		42,92

Tab. A.25: Dělič výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1310 nm s referenční hodnotou 6,88 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
I1	I2	-50,00		43,12
I1	O3	-19,18	12,30	
I1	O4	-23,67	16,80	
I2	I1	-50,00		43,12
I2	O3	-24,05	17,18	
I2	O4	-18,96	12,09	
O3	I1	-19,79	12,92	
O3	I2	-23,43	16,55	
O3	O4	-50,00		43,12
O4	I1	-24,38	17,50	
O4	I2	-18,33	11,46	
O4	O3	-50,00		43,12

Tab. A.26: Dělič výkonu se SN: 17012588 při vlnové délce 1550 nm s referenční hodnotou 7,08 dBm.

Vstupní port	Výstupní port	Výkon [dBm]	Vložený útlum [dB]	Izolace [dB]
I1	I2	-50,00		42,92
I1	O3	-10,11	3,03	
I1	O4	-10,09	3,01	
I2	I1	-50,00		42,92
I2	O3	-9,43	2,35	
I2	O4	-9,28	2,20	
O3	I1	-9,72	2,64	
O3	I2	-9,83	2,75	
O3	O4	-50,00		42,92
O4	I1	-9,40	2,32	
O4	I2	-9,33	2,25	
O4	O3	-50,00		42,92